



João Carlos Silva Costa

Licenciado em Ciências de Engenharia do Ambiente

**Avaliação do Risco de Galgamento
sobre as estruturas portuárias do
porto de Leixões**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente, perfil de Engenharia de Sistemas
Ambientais

Orientador: Professor Doutor José Carlos Ribeiro Ferreira,
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa.

Co-orientador: Doutora Conceição Juana Espinosa Morais
Fortes, Investigadora Principal do Laboratório Nacional de
Engenharia Civil (LNEC), Departamento de Hidráulica e
Ambiente (DHA), Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Júri:

Presidente: Professora Doutora Maria Teresa Calvão, FCT-UNL

Arguente: Professor Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

Vogal: Professor Doutor José Carlos Ferreira, FCT-UNL

Avaliação do Risco de Galgamento sobre as estruturas portuárias do porto de Leixões

Copyright © João Carlos Silva Costa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Todos os direitos reservados.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao professor José Carlos Ferreira por me ter direcionado para a abordagem ao tema desta dissertação, e ajuda nos momentos de indecisão.

A toda a família do LNEC, em especial à Eng^a Juana Fortes pelo constante apoio, orientação e pragmatismo que demonstrou ao longo de todo o meu trabalho nesta instituição. À Eng^a Liliana Pinheiro e ao Eng^o Pedro Poseiro, pela prontidão no esclarecimento de dúvidas que surgiram ao longo deste trabalho. A todos os companheiros de sala no LNEC, pelo convívio, companhia e motivação, em especial ao Bruno, Pedro e Gustavo.

À APDL pela disponibilização de dados base essenciais para a concretização deste trabalho.

A todos os meus colegas de Engenharia do Ambiente da FCT, por todos os momentos de companheirismo ao longo destes largos anos, em especial ao Resende, Hélio e Ferraz.

Aos meus pais, por me darem a oportunidade de frequentar e concluir este curso, através dos valores que me transmitiram, que são a base do que sou hoje.

Finalmente, à Martinha, por toda a força e incentivo, por todo o apoio incondicional, e por ter sido uma ajuda essencial nesta fase da minha vida.

Muito obrigado a todos.

RESUMO

A presente dissertação inserida na área de engenharia do Ambiente, explora o tema da segurança portuária, descrevendo-se uma metodologia implementada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para avaliação do risco associado a galgamentos inadmissíveis de estruturas portuárias.

Esta metodologia baseia-se na caracterização da agitação marítima incidente sobre as estruturas marítimas em análise, e consequente estimativa de valores de caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento destas estruturas.

Este trabalho representa a avaliação do risco de galgamento sobre as estruturas de defesa marítima do Porto de Leixões, iniciando-se com o processo de caracterização da agitação marítima incidente nestas estruturas, recorrendo a previsões de agitação marítima em águas profundas fornecidas pelo modelo WAM, acoplados aos modelos numéricos de propagação de ondas, SWAN e DREAMS. Os valores de galgamento foram calculados mediante a utilização da ferramenta NN_OVERTOPPING2, baseada na análise de redes neuronais.

Posteriormente, a avaliação do risco de galgamento apresentada nesta dissertação resulta da combinação dos valores de probabilidade e de consequências respeitantes à ocorrência de caudais médios galgados superiores a valores limite estipulados. Os valores de probabilidade de caudal de galgamento inadmissível, resultam do cálculo do quociente entre o número de registos de agitação marítima, superior aos valores limite estipulados, pelo número total de registos de agitação marítima incidentes na estrutura em análise, sendo posteriormente multiplicados pelos valores de consequência, representativos de cada zona de estudo, culminando nos valores do risco. Finalmente, é desenvolvido um mapa de risco do Porto de Leixões, representativo do grau de risco para cada estrutura analisada, e dos locais mais sensíveis em termos de segurança e operacionalidade. Esta metodologia assenta em dados de agitação marítima representativa de um período de 38 anos (1979 – 2016), sendo aplicada nas duas estruturas de defesa marítima do Porto de Leixões, nomeadamente o quebra-mar Norte e o molhe Sul, totalizando um conjunto de 15 pontos de análise, ao longo das estruturas referidas.

Esta avaliação representa uma primeira análise ao risco de galgamento sobre a totalidade das estruturas de proteção frontal do Porto de Leixões que, apesar de não muito complexa, mostra-se eficaz na identificação dos locais de maior sensibilidade em termos de galgamentos inadmissíveis, servindo de base para metodologias mais complexas de avaliação do risco e contendo informação pertinente para a tomada de decisão e gestão em zonas portuárias.

Palavras-chave: Agitação marítima; Galgamento; Avaliação de risco: Porto de Leixões;

ABSTRACT

Based on Environmental Engineering, this thesis explores the theme of port security, describing a methodology implemented in the National Laboratory of Civil Engineering (LNEC) to evaluate the overtopping risk in port structures.

This methodology is based on the characterization of the incident sea state on the marine structures under analysis, and consequent estimation of values concerning the overtopping discharges per unit length of the crest of these structures.

This work represents the overtopping risk assessment on the maritime defense structures of the Leixões port, starting with the process of sea state characterization in these structures, using deep-water wave data provided by the WAM model, coupled to numerical wave propagation models, SWAN and DREAMS. The overtopping outcomes were calculated using the NN_OVERTOPPING2 tool, based on neural network analysis.

Subsequently, the overtopping risk assessment represented in this dissertation results from the combination of probability and consequences values related to the occurrence of exceeding overtopping discharges above pre-determined thresholds. The overtopping probability values results from the quotient between the number of overtopping events exceeding the stipulated thresholds by the total number of sea states incident on the structure under analysis and then multiplied by consequences values of such events, representative of each study area, culminating on risk values. Finally, a risk map of the Leixões port is developed, representing the degree of risk for each structure analyzed, and the most sensitive sites in terms of port safety and operability. This methodology is based on sea-wave data representative from a period of 38 years (1979 - 2016), being applied in the two maritime defense structures of the Leixões port, namely the North breakwater and the South mole, totaling 15 points of analysis along the referred structures.

This evaluation represents a first analysis of overtopping risk on all the maritime structures of Leixões port, which, although simplistic, is effective in identifying the most sensitive stretches in terms of inadmissible overtopping discharges, serving as a basis for more complex methodologies and containing relevant information for long-term decision-making and management in port areas.

Keywords: Marine agitation; Overtopping phenome; Risk assessment: Leixões port;

ÍNDICE

RESUMO	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABELAS.....	XV
ÍNDICE DE QUADROS	XVII
LISTA DE SIGLAS	XIX
LISTA DE ABREVIATURAS	XXI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.3. METODOLOGIA GERAL.....	3
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2. O FENÓMENO DE GALGAMENTO	7
2.1. INTRODUÇÃO	7
2.2. FATORES CONDICIONANTES	9
2.2.1. <i>Agitação marítima</i>	9
2.2.2. <i>Nível de maré</i>	11
2.2.3. <i>Características das estruturas</i>	11
2.3. METODOLOGIAS DE CÁLCULO DE GALGAMENTO.....	14
2.3.1. <i>Introdução</i>	14
2.3.2. <i>Redes neuronais artificiais</i>	15
2.4. LIMITES ADMISSÍVEIS PARA GALGAMENTOS EM ESTRUTURAS MARÍTIMAS.....	20
3. AVALIAÇÃO DO RISCO DE GALGAMENTO	23
3.1. INTRODUÇÃO	23

3.2.	RISCO, VULNERABILIDADE E RESILIÊNCIA PORTUÁRIA.....	23
3.3.	METODOLOGIA ADOTADA	25
4.	INTRODUÇÃO AO CASO DE ESTUDO – PORTO DE LEIXÕES	31
4.1.	CARACTERIZAÇÃO GERAL DO PORTO	31
4.2.	CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS MARÍTIMAS E INSTALAÇÕES PORTUÁRIAS	36
4.2.1.	<i>Terminal de Petroleiros.....</i>	<i>36</i>
4.2.2.	<i>Terminal de Cruzeiros.....</i>	<i>39</i>
4.2.3.	<i>Terminal multiusos.....</i>	<i>42</i>
4.3.	EVENTOS DE TEMPORAL NO PORTO	43
4.4.	ASPETOS SENSÍVEIS DO PORTO	48
5.	AGITAÇÃO E GALGAMENTO	53
5.1.	DADOS DISPONÍVEIS	53
5.1.1.	<i>Introdução.....</i>	<i>53</i>
5.1.2.	<i>Caraterização da agitação marítima ao largo do Porto de Leixões.....</i>	<i>54</i>
5.1.3.	<i>Nível de maré.....</i>	<i>58</i>
5.2.	CARACTERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA JUNTO À COSTA	60
5.2.1.	<i>Introdução.....</i>	<i>60</i>
5.2.2.	<i>Condições de aplicação do modelo SWAN.....</i>	<i>60</i>
5.2.3.	<i>Análise de resultados</i>	<i>63</i>
5.3.	CARATERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA NO INTERIOR DO PORTO	66
5.3.1.	<i>Introdução.....</i>	<i>66</i>
5.3.2.	<i>Condições de aplicação do modelo DREAMS</i>	<i>68</i>
5.3.3.	<i>Análise de resultados</i>	<i>70</i>
5.4.	CAUDAL MÉDIO GALGADO.....	75
5.4.1.	<i>Introdução.....</i>	<i>75</i>
5.4.2.	<i>Condições de aplicação da ferramenta NN_OVERTOPPING2</i>	<i>76</i>

5.4.3.	<i>Análise de resultados</i>	86
6.	AVALIAÇÃO DE RISCO PARA O PORTO DE LEIXÕES	93
6.1.	VALORES ADMISSÍVEIS	93
6.2.	GRAU DE PROBABILIDADES DE OCORRÊNCIA	96
6.3.	GRAU DE CONSEQUÊNCIA.....	100
6.4.	GRAU DE RISCO	101
6.5.	MAPA DE RISCO	102
7.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	105
7.1.	PRINCIPAIS RESULTADOS.....	105
7.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
ANEXOS		113
ANEXO A	EXECUÇÃO DO MODELO SWAN	113
ANEXO B	RESULTADOS DO MODELO SWAN.....	116
ANEXO C	EXECUÇÃO DO MODELO DREAMS	118
ANEXO D	RESULTADOS DO MODELO DREAMS.....	123
ANEXO E	EXECUÇÃO DA FERRAMENTA NN_OVERTOPPING2	134
ANEXO F	RESULTADOS DA FERRAMENTA NN_OVERTOPPING2	136

ÍNDICE DE FIGURAS

figura 1.1 - metodologia para a avaliação do risco de galgamento aplicada para o porto de leixões.	5
figura 2.1 - ocorrência do fenómeno de galgamento no molhe norte do porto de leixões, a 20 de fevereiro de 2014 (bairrão, 2014).	8
figura 2.2 -exemplos de fenómenos de galgamento no quebra-mar norte do porto de leixões, do tipo salpicos (a) e lâmina de água (b). (fotos de zacarias pereira da mata, retirado de www.dreamstime.com, 2017).	8
figura 2.3 - perfil de onda genérica (adaptado de beirão et al., 2014).	9
figura 2.4 – esquema de um perfil representativo de um quebra-mar de talude (adaptado de lourenço, 2016).	12
figura 2.5 - parâmetros relevantes na geometria de uma estrutura de defesa (coeveld et al., 2007).	13
figura 2.6 - ângulo entre a direção de propagação da onda e a normal à estrutura (patrício, 2012).	13
figura 2.7 - esquema representativo de uma rede neuronal artificial de três camadas, nn_overtopping2 (adaptado de van gent, 2007).	16
figura 2.8 - representação do parâmetro β'	17
figura 2.9 - exemplo de perfil de uma estrutura marítima, com identificação dos 15 parâmetros associados à geometria da mesma (coeveld et al, 2005).	19
figura 3.1 - processo de gestão do risco (adaptado de np iso 31000:2013).	24
figura 4.1 - localização geográfica do porto de leixões.	31
figura 4.2 - construção do porto de leixões (1884 - 1892) - titãs de leixões, localizados na extremidade dos molhes norte e sul (ferreira, 2009).	32
figura 4.3 - estruturas de defesa do porto de leixões (adaptado de google earth).	33
figura 4.4 - doca de recreio, localizada no enraizamento do molhe norte do porto de leixões (fonte:apdl, 2017).	33
figura 4.5 – porto de pesca do porto de leixões (fonte: apdl, 2017).	34
figura 4.6 -terminal de cruzeiros sul do porto de leixões (apdl, 2017).	34
figura 4.7 - terminais existentes no porto de leixões (adaptado de apdl, 2017).	35
figura 4.8 - vista aérea do porto de leixões (adaptado de google earth).	36
figura 4.9 - manto resistente da cabeça do quebra-mar norte (arquivo apdl, 2012 in castro, 2015).	36
figura 4.10 - posto "a" do terminal de petroleiros. destaque para o método de acostagem em duque d'alba (imagem à direita) (apdl, 2016).	37
figura 4.11 - postos "b" e "c" do terminal de petroleiros (fonte: apdl, 2017).	37
figura 4.12 - tanques de armazenagem, edifícios e equipamentos localizados no terminal de petroleiros, entre os postos "a" e "b" (adaptado de google earth).	38
figura 4.13 - condutas existentes no terminal de petroleiros e corredor circulável ao longo do quebra-mar norte (imagem à direita) (fonte: jornal de notícias 2015).	38

figura 4.14 – localização do quebra-mar submerso em frente ao manto exterior da cabeça do quebra-mar norte do porto de leixões. (rosa-santos, 2010).....	39
figura 4.15 – cais acostável do terminal de cruzeiros do porto de leixões (apdl, 2017).	40
figura 4.16 – edifício central do terminal de cruzeiros, e miradouro no topo do mesmo (imagem à direita) (apdl, 2017).	40
figura 4.17 - estação de passageiros no terminal de cruzeiros. exemplo de tipologia dos veículos de transporte de passageiros (apdl, 2017).	41
figura 4.18 – cais de atracagem (imagem à esquerda) e manga de acesso aos navios (imagem à direita) (apdl, 2017).	41
figura 4.19 - doca de recreio do terminal de cruzeiros (apdl, 2017).	42
figura 4.20 - terminal multiusos do porto de leixões (apdl, 2017).	42
figura 4.21 - zona circulável na ligação entre os terminais de cruzeiros e multiusos (adaptado de google earth).	43
figura 4.22 - evento de temporal com galgamentos significativos junto ao posto a, no terminal de petroleiros de leixões. (foto de zacarias pereira da mata, retirado de www.dreamstime.com).	43
figura 4.23 - comparação da direção média anual da ondulação com a direção associada às situações de temporal persistente (dados do instituto hidrográfico para a boia de leixões, recolhidos entre 1993 e 2003), (adaptado de coelho, 2005, in rosa-santos, 2010).	46
figura 4.24 - período médio das ondas de longo período registadas no marégrafo de leixões em 1995. (adaptado de rosa-santos, 2010).	47
figura 4.25 – altura média das ondas de longo período registadas no marégrafo de leixões em 1995. (adaptado de rosa-santos, 2010).	47
figura 4.26 – zona interior do porto adjacente à extremidade sul do quebra-mar norte de leixões (imagem à esquerda), e zona de afloramentos rochosos e de acumulação de materiais removidos da estrutura principal do quebra-mar durante os temporais (rosa-santos, 2010).	48
figura 4.27 – direção de agitação marítima mais desfavorável às estruturas marítimas de leixões (adaptado de google maps).	48
figura 4.28 – posto de acostagem de petroleiros (posto “a”), no quebra-mar norte do porto de leixões (teixeira, 2012).	49
figura 4.29 -exemplo de desgaste do manto resistente de tetrápodes, na extremidade sul do quebra-mar norte de leixões, adjacente ao posto a (arquivo apdl, 2009, em castro, 2015).	49
figura 4.30 – condições de operacionalidade do posto a, do terminal de petroleiros do porto de leixões (ihrh-feup, 2004, em rosa-santos, 2010)	50
figura 4.31 - terminal oceânico de leixões (apdl, 2017).	51
figura 5.1 - processo de caracterização da agitação marítima desde o largo à entrada do porto de leixões.	54
figura 5.2 - localização do ponto de cálculo do modelo de reconstituição wam (ponto w), comparativamente ao porto de leixões, representado pelo retângulo a vermelho (adaptado de google earth).	55

figura 5.3 - altura de onda significativa (h_s) calculada pelo wam, para o período de 1979 a 2016.	56
figura 5.4 – período de pico (t_p) calculado pelo wam, para o período de 1979 a 2016.	56
figura 5.5 - direção de onda (dir) calculada pelo wam, para o período de 1979 a 2016.	57
figura 5.6 - ocorrência em percentagem dos parâmetros h_s e t_p . dados do ecmwf no ponto w.	57
figura 5.7 - ocorrência em percentagem dos parâmetros h_s e dir . dados do ecmwf no ponto w.	58
figura 5.8 - variação do nível de maré durante os 38 anos avaliados (de 1979 a 2016)	59
figura 5.9 - batimetria e malhas utilizadas na aplicação do modelo swan.	61
figura 5.10 – representação dos pontos de cálculo do modelo swan e indicação dos pontos p14, w(ecmwf) e l (boia ondógrafo de leixões).	62
figura 5.11 - representação das direções de onda no ponto p14 da ferramenta swan	64
figura 5.12 - ocorrência em percentagem dos parâmetros h_s e t_p . dados do swan no ponto p14.	65
figura 5.13 - ocorrência em percentagem dos parâmetros h_s e dir . dados do swan no ponto p14.	65
figura 5.14 -grelha batimétrica e linha de costa, utilizada no modelo dreams.	68
figura 5.15 - domínio de cálculo do modelo dreams.	70
figura 5.16 - identificação dos 44 pontos corridos na ferramenta dreams (representados a preto e a branco) e valores de batimetria do porto de leixões	71
figura 5.17 – representação dos 15 pontos em estudo no modelo dreams e utilizados, posteriormente, na ferramenta nn_overtopping (d_1 a d_{15})	71
figura 5.18 - histogramas de alturas de onda significativas (período de janeiro de 1979 a agosto de 2016).	74
figura 5.19 - partes constituintes de uma estrutura costeira comum (adaptado de coeveld et al., 2005)	76
figura 5.20 - localização do ponto d1 (vista da praia da leça da palmeira), estudado no modelo dreams e na ferramenta neuronal nn_overtopping2.	77
figura 5.21 - localização dos pontos d1, d2, d3, d4 e d5, estudados no modelo dreams e na ferramenta neuronal nn_overtopping2 (retirado de www.apdl.pt).	77
figura 5.22 - esquema representativo do perfil 3 (disponibilizado pela apdl).	78
figura 5.23 - estrutura composta por mais de duas partes inclinadas (coeveld et al., 2005).	78
figura 5.24 - caso excecional com berma de coroamento inclinada (coeveld et al., 2005).	79
figura 5.25 - esquema representativo do perfil 2 (disponibilizado pela apdl).	79
figura 5.26 - localização dos pontos d6, d7, d8, d9 e d10 estudados no modelo dreams e na ferramenta neuronal nn_overtopping2 (adaptado de rosa-santos, 2010).	80
figura 5.27 - localização dos pontos d11, d12 e d13, estudados no modelo dreams e na ferramenta neuronal nn_overtopping2 (retirado de www.apdl.pt).	81
figura 5.28 - localização dos pontos d14 e d15, estudados no modelo dreams e na ferramenta neuronal nn_overtopping2 (retirado de www.apdl.pt).	82
figura 5.29 - esquema representativo do perfil 24 (disponibilizado pela apdl).	82

figura 5.30 – caso excecional em que a berma de coroamento se localiza abaixo no nível de repouso da água (adaptado de coeveld et al., 2005).	83
figura 5.31 - série temporal do parâmetro $ghm0tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto d8, obtidos através da ferramenta neuronal $nn_overtopping2$	87
figura 5.32 - série temporal do parâmetro $ghm0tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto d9, obtidos através da ferramenta neuronal $nn_overtopping2$	87
figura 5.33 - histogramas relativos aos registos de q (l.s-1/m) e direção de onda ($^{\circ}$) para os pontos d2 e d8.....	91
figura 5.34 - histogramas relativos aos registos de q (l.s-1/m) e direção de onda ($^{\circ}$) para os pontos d14 e d15 (quadros da direita e esquerda, respetivamente).	92
figura 6.1 - probabilidade de ocorrência de galgamento superior aos valores admissíveis, nos 15 pontos em estudo, discriminados por sector.	97
figura 6.2 - representação gráfica do grau de risco de galgamento nos 15 pontos de estudo, determinado pela metodologia adotada (adaptado de google earth).	103
figura 0.1 - caracterização das malhas a utilizar.....	114
figura 0.2 - exemplo de ficheiro representativo das condições de agitação marítima de 1979 a 1983, provenientes do modelo wam.	114
figura 0.3 - exemplo do ficheiro "transfer.dat" gerado pelo modelo swan	115
figura 0.4 - comparação entre os dados de altura significativa fornecidos pelo wam, e os obtidos através do swan.	116
figura 0.5 - comparação entre os dados de período de pico de onda fornecidos pelo wam, e os obtidos através do swan.	116
figura 0.6 - relação entre os valores de h_s e dir no ponto p14 obtidos pelo modelo swan.....	117
figura 0.7 - relação entre os valores de h_s e tm no ponto p14 obtidos pelo modelo swan.....	117
figura 0.8 – procedimento de seleção do projeto.....	118
figura 0.9 - separador "file names" contendo as directorias dos ficheiros representativos das condições de fronteira.	119
figura 0.10 - exemplo de ficheiros "con_dad." e "nodes_dad." utilizados.....	119
figura 0.11 - exemplo de ficheiro "dados_pontos.dad" utilizado.	120
figura 0.12 - exemplo de matriz h/h_0 para os pontos com condições $t_p=4$, $\theta=180^{\circ}$ e $nm=1$	121
figura 0.13 - exemplo de ficheiro relativo à matriz de transferência do ponto p1.	121
figura 0.14 - exemplo de ficheiro de resultados dreams, relativo ao ponto p1.	122
figura 0.15 - série temporal de altura significativa (h_s) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams.	123
figura 0.16 - série temporal de altura significativa (h_s) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams.	123
figura 0.17 - série temporal de altura significativa (h_s) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams.	124
figura 0.18 - série temporal de altura significativa (h_s) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams.	124

figura 0.19 - série temporal de altura significativa (hs) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams.	125
figura 0.20 - série temporal de altura significativa (hs) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams.	125
figura 0.21 - série temporal de altura significativa (hs) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams	126
figura 0.22 - série temporal de altura significativa (hs) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams	126
figura 0.23 - série temporal de altura significativa (hs) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams	127
figura 0.24 - série temporal de altura significativa (hs) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams	127
figura 0.25 - série temporal de altura significativa (hs) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams	128
figura 0.26 - série temporal de altura significativa (hs) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams	128
figura 0.27 - série temporal de altura significativa (hs) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams	129
figura 0.28 - série temporal de altura significativa (hs) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams	129
figura 0.29 - série temporal de altura significativa (hs) no ponto d1, obtido pelo modelo dreams	130
figura 0.30 - histogramas de alturas significativas (d1 a d5).....	130
figura 0.31 - histogramas de alturas significativas (d6 a d10).....	131
figura 0.32 - histogramas de alturas significativas (d11 a d15).	131
figura 0.33 – comparação entre os valores de hs obtidos através no modelo dreams, correspondentes a cinco pontos (d1 a d5) pertencentes ao quebra-mar norte.....	132
figura 0.34 - comparação entre os valores de hs obtidos através no modelo dreams, correspondentes a cinco pontos (d6 a d10) pertencentes ao molhe sul.	132
figura 0.35 - comparação entre os valores de hs obtidos através no modelo dreams, correspondentes aos cinco pontos (d11 a d15) pertencentes ao quebra-mar sul.	133
figura 0.36 - período médio (tm) calculado pelo modelo dreams para o conjunto dos 15 pontos analisados	133
figura 0.37 - exemplo de ficheiro " nn_overtopping.inp ".	134
figura 0.38 - exemplo de ficheiro "nn_overtopping.lis".....	135
figura 0.39 - série temporal do parâmetro ghm0tm-1,0 e do caudal médio galgado, q, no ponto d1, obtidos através da ferramenta neuronal nn_overtopping2.	136
figura 0.40 - série temporal do parâmetro ghm0tm-1,0 e do caudal médio galgado, q, no ponto d2, obtidos através da ferramenta neuronal nn_overtopping2.	136
figura 0.41 - série temporal do parâmetro ghm0tm-1,0 e do caudal médio galgado, q, no ponto d3, obtidos através da ferramenta neuronal nn_overtopping2.	137

figura 0.42 - série temporal do parâmetro $ghm0tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto d4, obtidos através da ferramenta neuronal $nn_overtopping2$	137
figura 0.43 - série temporal do parâmetro $ghm0tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto d5, obtidos através da ferramenta neuronal $nn_overtopping2$	138
figura 0.44 - série temporal do parâmetro $ghm0tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto d6, obtidos através da ferramenta neuronal $nn_overtopping2$	138
figura 0.45 - série temporal do parâmetro $ghm0tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto d7, obtidos através da ferramenta neuronal $nn_overtopping2$	139
figura 0.46 - série temporal do parâmetro $ghm0tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto d9, obtidos através da ferramenta neuronal $nn_overtopping2$	139
figura 0.47 - série temporal do parâmetro $ghm0tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto d10, obtidos através da ferramenta neuronal $nn_overtopping2$	140
figura 0.48 - série temporal do parâmetro $ghm0tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto d11, obtidos através da ferramenta neuronal $nn_overtopping2$	140
figura 0.49 - série temporal do parâmetro $ghm0tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto d12, obtidos através da ferramenta neuronal $nn_overtopping2$	141
figura 0.50 - série temporal do parâmetro $ghm0tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto d13, obtidos através da ferramenta neuronal $nn_overtopping2$	141
figura 0.51 - série temporal do parâmetro $ghm0tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto d14, obtidos através da ferramenta neuronal $nn_overtopping2$	142
figura 0.52 - série temporal do parâmetro $ghm0tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto d15, obtidos através da ferramenta neuronal $nn_overtopping2$	142

ÍNDICE DE TABELAS

tabela 2.1 - valores do coeficiente de rugosidade e permeabilidade, para determinados tipos de materiais (adaptado de coeveld et al, 2005).....	19
tabela 4.1 - localização das estações ondógrafo de leixões ao longo do tempo (adaptado de coelho, 2005).....	44
tabela 4.2 - número de registos em condições de temporal persistente, efetuados nos diferentes meses do período entre 1981 e 2003 (dados do instituto hidrográfico para a boia de leixões) (adaptado de coelho, 2005).....	45
tabela 5.1 – análise estatística referente ao ponto ao largo do porto de leixões, obtidos com o modelo wam.	55
tabela 5.2 - coordenadas dos pontos de cálculo do estudo.	62
tabela 5.3 - análise estatística dos resultados obtidos com o modelo swan para o ponto p14..	63
tabela 5.4 - comparação entre a direção de onda registada nos modelos wam e swan.....	64
tabela 5.5 - gamas admitidos no modelo dreams	69
tabela 5.6 - pontos utilizados no modelo dreams	72
tabela 5.7 - análise estatística do parâmetro hs nos 15 pontos analisados pelo modelo dreams.	73
tabela 5.8 - análise estatística do parâmetro de tm nos 15 pontos analisados pelo modelo dreams	73
tabela 5.9 - direção média de propagação de onda (θ_m) para os 15 pontos analisados.....	74
tabela 5.10 (continuação) - direção média de propagação de onda (θ_m) para os 15 pontos analisados	75
tabela 5.11 - análise estatística do parâmetro q, obtido através da ferramenta nn_overtopping, nos 15 pontos em análise.	86
tabela 5.12 - características de agitação marítima, para cada um dos 15 pontos, nas datas onde se observaram valores máximos de caudal de galgamento (identificados a amarelo).	88
tabela 5.13(continuação) - características de agitação marítima, para cada um dos 15 pontos, nas datas onde se observaram valores máximos de caudal de galgamento (identificados a amarelo).	89

ÍNDICE DE QUADROS

quadro 2.1 - valores admissíveis do caudal médio de galgamento admissível para as estruturas marítimas (adaptado de pullen et al., 2007).	20
quadro 2.2 - valores admissíveis do caudal médio de galgamento admissível para pessoas (adaptado de pullen et al., 2007).	21
quadro 2.3 - valores admissíveis do caudal médio de galgamento para circulação de veículos (adaptado de pullen et al., 2007).	21
quadro 2.4 - valores admissíveis do caudal médio de galgamento para navios, equipamentos e edifícios na zona abrigada da estrutura (adaptado de pullen et al., 2007).	22
quadro 3.1 - graus de probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis (adaptado de poseiro et al, 2013).	26
quadro 3.2 - grau de consequências associadas à ocorrência de um acontecimento perigoso (adaptado de poseiro, 2013).	27
quadro 3.3 - aceitabilidade do grau de risco (fortes et al., 2014).	29
quadro 5.1 - ângulo formado pela normal à estrutura relativamente ao norte.	83
quadro 5.2 (continuação) - ângulo formado pela normal à estrutura relativamente ao norte.	84
quadro 5.3 - dados da ferramenta nn_overtopping_2 para os pontos analisados.	85
quadro 6.1 - valores críticos de caudal médio de galgamento e distância de avaliação do galgamento, quando aplicável.	96
quadro 6.2 – número, probabilidade e grau de ocorrências de galgamento superior aos valores admissíveis para os pontos analisados.	97
quadro 6.3 - grau de consequências considerado em cada ponto.	100
quadro 6.4 - grau de risco de galgamento em cada ponto analisado.	101
quadro 6.5 (continuação) - grau de risco de galgamento em cada ponto analisado.	102

LISTA DE SIGLAS

- A_c - Distância entre o nível médio da água e a cota da berma de coroamento da estrutura
- B - Largura da berma da estrutura medida na horizontal
- B_t - Largura da banquetta do pé de talude da estrutura
- G_c - Largura da berma de coroamento da estrutura
- H - Altura da onda num ponto considerado no domínio de cálculo
- h - Profundidade local; profundidade no pé da estrutura
- h_b - Profundidade na berma da estrutura
- H_{m0} - Altura de onda significativa espectral no pé da estrutura
- $H_{m0, Toe}$ - Altura de onda significativa espectral no pé da estrutura
- $H_{m\acute{a}x}$ - Altura máxima das ondas
- H_s - Altura da onda significativa
- $H_{sm\acute{a}x}$ - Altura significativa máxima das ondas
- h_t - Profundidade na banquetta do pé do talude da estrutura
- q - Caudal médio galgado por metro linear de estrutura
- q_x - Caudal médio de galgamento a uma distância x da estrutura galgada
- R_c - Distância entre o nível de repouso da água e a cota de coroamento da parte impermeável da estrutura
- T - Período da onda num ponto considerado no domínio de cálculo
- $T_{m-1,0, Toe}$ - Período médio de onda espectral no pé do talude da estrutura, definido por $m-1/m0$
- T_m - Período médio da onda
- $T_{m\acute{a}x}$ - Período máximo das ondas
- T_p - Período de pico do espectro de períodos das ondas
- T_z - Período médio das ondas entre zeros ascendentes
- x - Distância entre a estrutura marítima e o ponto de avaliação do caudal médio galgado
- α - Ângulo da estrutura em relação ao norte
- α_b - Ângulo que a berma da estrutura faz com a horizontal
- α_d - Ângulo que o talude imediatamente abaixo da berma faz com a horizontal

α_u - Ângulo que o talude imediatamente acima da berma faz com a horizontal

β - Ângulo entre a direção de propagação da onda incidente e a normal à estrutura

γ_r - Parâmetro indicativo da rugosidade e permeabilidade da estrutura

θ - Direção de propagação das ondas em relação ao norte; direção da onda num ponto considerado no domínio de cálculo

θ_m - Direção média de propagação das ondas

θ_p - Direção de pico do espectro de direções de propagação das ondas

LISTA DE ABREVIATURAS

AHP - Analytic Hierarchy Process (Processo de Análise Hierárquica)

APDL - Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A

CLASH - Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neural Network Prediction and Hazard Analysis on Permissible Wave Overtopping

DREAMS - Diffraction-REfraction Analysis Mild Slope Model

ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NM - Nível médio da água do mar

NM_{máx} – Máximo valor do nível médio das águas do mar

NN - Neural Network (rede neuronal)

NNW – Norte-noroeste

NW – Noroeste

SE – Sudeste

SW – Sudoeste

SWAN - Simulating Waves Nearshore

W – Oeste

WAM – Wave Modelling

WAMDI - Wave Model Development and Implementation

WNW – Oeste-noroeste

Z.H. - Zero Hidrográfico

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A avaliação do risco associado a fenómenos de galgamento de estruturas marítimas em zonas portuárias tem sido amplamente estudada ao longo dos últimos anos, por consequência do paradigma atual, onde se observa um desenvolvimento dos portos, perante o aumento contínuo das trocas comerciais e economia de escala. Para aumentar a capacidade de resposta dos portos comerciais, o desenvolvimento implica mais equipamentos e infraestruturas no porto, operações de dragagem para atracagem de navios de maior calado e maior tráfego de navios, estando as estruturas marítimas de proteção destas zonas, mais expostas às ações adversas da agitação marítima (Alises et al., 2014). Deste modo, a determinação das consequências dos fenómenos de galgamento é um assunto de extrema importância para a avaliação, quer do risco físico das próprias estruturas, quer dos riscos associados à inundação destas zonas (Neves et al., 2012).

Este é um assunto crucial em Portugal, devido à vulnerabilidade do nosso litoral, continental e insular, aos efeitos negativos das alterações climáticas, nomeadamente à subida do nível médio do mar e aos eventos extremos como tempestades, que provocam intensa erosão, galgamento oceânico e inundações costeiras (Ferreira, 2016). O galgamento de estruturas marítimas portuárias e a consequente inundação das zonas protegidas pelas mesmas, podem acarretar consequências nefastas para a gestão dos portos comerciais, afetando a economia, local e regional, resultando em prejuízos devido à inoperacionalidade do porto, a danos em navios atracados nos terminais, a danos em equipamentos e edifícios localizados nas zonas inundadas, ou ainda a ferimentos em pessoas ou perda de vidas humanas (Lourenço, 2016).

Neste quadro, e atendendo à capacidade que as estruturas marítimas portuárias têm em melhorar as condições de vida do Homem, possibilitando a segurança no intercâmbio de mercadorias e passageiros entre cidades e países de todo o mundo (Rodrigues, 2014), torna-se fundamental prever situações de risco em zonas portuárias e costeiras, realizar mapas de risco para apoio à decisão das entidades responsáveis e emitir atempadamente alertas, minimizando o risco de perda de vidas e reduzindo os prejuízos económicos e ambientais (Neves et al., 2012).

Os trabalhos realizados no âmbito da presente dissertação visam avaliar o risco associado ao galgamento de vários trechos das estruturas marítimas do porto de Leixões, que têm vindo a ser alvo de vários estudos motivados pela forte agitação marítima local e fenómenos de galgamento. Devido aos problemas referidos, Bairrão et al.,(2016) estudou as diferentes possibilidades geométricas e de posicionamento do quebra-mar submerso (localizado na zona frontal ao quebra-mar Norte), recorrendo à modelação numérica do regime de agitação marítima local, com o intuito de aferir a influência do mesmo no fenómeno de galgamento do quebra-mar Norte. Rosa-Santos (2010) estudou a interação dos navios com os dispositivos de acostagem e de amarração, recorrendo aos dados

observados em modelo físico, motivado pelos efeitos da agitação marítima em navios acostados no Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões. Devido à forte agitação marítima sentida no local, os navios experimentam movimentos de grande amplitude, que podem conduzir a situações de inoperacionalidade, mas também à rotura de alguns cabos de amarração do navio. Já Gomes et al., (2009), deparando-se com a necessidade de melhorar as condições de operacionalidade do Posto A, protegido pelo quebra-mar Norte, testou diferentes alternativas geométricas para esta estrutura marítima, de modo a melhorar as condições de estabilidade e minimizar o fenómeno de galgamento.

Tendo em conta os estudos efetuados sobre a segurança e operacionalidade do Porto de Leixões, houve a necessidade de estudar e avaliar o risco de galgamento das estruturas marítimas mais importantes do mesmo, referentes às estruturas de defesa do Terminal de Petroleiros e do novo Terminal de Cruzeiros (inaugurado em 2011). Apesar de haver registos de estudos referentes à estrutura marítima do Terminal de Petroleiros, o molhe Sul carece de uma avaliação sobre os efeitos de galgamento nesta estrutura, que serve de proteção ao Terminal de Cruzeiros.

Neste sentido, tem-se vindo a abordar esta temática através da aplicação de diferentes metodologias para a avaliação do risco de galgamento. O Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Lisboa (LNEC) utiliza uma metodologia direcionada para a ocorrência de galgamentos em estruturas portuárias e costeiras, identificando-se os valores limites do caudal médio galgado por metro linear de estrutura, atribuindo-se graus de probabilidade e de consequência e culminando no cálculo do grau de risco. Esta metodologia foi utilizada por Reis et al, (2011) para a estrutura de proteção costeira da baía da Praia da Vitória nos Açores, determinando, primeiramente, a agitação marítima no local recorrendo a uma metodologia de acoplamento de modelos numéricos de propagação de ondas, tendo o cálculo dos galgamentos sido efetuado com recurso à ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2. Os resultados foram posteriormente comparados com os valores limite de galgamento sugeridos por Pullen et al, (2007).

Rodrigues et al, (2014) utilizou a mesma metodologia para avaliar o risco de galgamento das estruturas do Porto de Ponta Delgada nos Açores, baseando-se num período de trinta e quatro anos (1979 – 2013) de dados de agitação marítima e de nível de mar, tendo sido realizada a avaliação para doze secções. A metodologia de avaliação do risco foi efetuada em três fases: caracterização da agitação incidente nas estruturas do porto; cálculo do galgamento; avaliação do risco de galgamento incluindo a avaliação da probabilidade de ocorrência de galgamentos acima de um certo limiar predefinido, assim como a avaliação das consequências dessas ocorrências.

Analogamente, Neves et al, (2012) avaliou o risco associado ao galgamento no porto de Sines recorrendo a esta metodologia, tendo determinado o grau de risco para três estruturas do porto em estudo.

Os resultados da aplicação desta metodologia de avaliação do risco são apresentados sob a forma de mapas de consequências e de risco, ferramentas importantes para o planeamento de operações e de futuras intervenções em portos comerciais e zonas costeiras.

Por conseguinte, tendo em consideração os eventos adversos de agitação marítima, o Porto de Leixões apresenta-se como um local apropriado para testar a metodologia descrita, e avaliar o risco decorrente dos fenómenos de galgamento das estruturas marítimas neste porto.

1.2. Objetivos

Esta dissertação incide na avaliação do risco de galgamento das estruturas marítimas do Porto de Leixões, tendo como intuito ser um documento onde se expõe os principais riscos associados à inoperacionalidade, perda de bens materiais e segurança neste porto. Como tal, pretende-se estudar o fenómeno de galgamento sobre as estruturas referentes ao quebra-mar Norte e molhe Sul, e qual a sua influência nas atividades portuárias desenvolvidas nestes locais do Porto de Leixões.

Consequentemente, pretende-se com o presente estudo:

- Avaliar a probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis sobre as estruturas marítimas do Porto de Leixões, seguindo uma metodologia de avaliação de risco desenvolvida pelo LNEC;
- Avaliar as consequências da ocorrência de galgamentos sobre as estruturas, em termos de segurança portuária;
- Elaborar um mapa de risco elucidativo dos locais de maior sensibilidade em termos de galgamento não admissível, com necessidade de intervenção por parte da autoridade portuária.

Face a trabalhos realizados no mesmo âmbito e para o mesmo porto, o presente estudo apresenta uma análise de risco mais vasta, com incidência em vários trechos das duas principais estruturas de defesa marítima do Porto de Leixões, assim como uma caracterização do regime de agitação marítima proveniente da análise de dados referentes a um período extenso de 38 anos.

1.3. Metodologia geral

A metodologia de avaliação do risco de galgamento foi aplicada em quinze secções distintas das estruturas marítimas do Porto de Leixões, incluindo o quebra-mar Norte (10 secções) e o Molhe Sul (5 secções). Este processo de avaliação compreende três processos fundamentais (Figura 1.1):

Caracterização do regime de agitação marítima em frente a cada estrutura:

- Analisar o regime de agitação marítima ao largo do Porto de Leixões através dos dados disponibilizados pela ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather

Forecast) recorrendo ao modelo WAM (Wave Modeling).(Hasselmann et al., 1988), para o período de janeiro de 1979 a agosto de 2016;

- Aplicar o modelo SWAN (Booij et al., 1999) para modelar a propagação da agitação marítima desde o largo até à zona costeira;
- Aplicar o modelo DREAMS (Fortes, 2002) para modelar a propagação da agitação marítima até às estruturas a analisar.
- Interpretar os resultados obtidos para cada modelo.

Cálculo do caudal médio galgado sobre as estruturas:

- Identificar as secções mais importantes do porto de Leixões, ao longo do quebra-mar Norte e molhe Sul;
- Definir os parâmetros estruturais e geométricos de cada secção, através da interpretação dos perfis tipo;
- Aplicar a ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al., 2005) para obter os dados referentes ao caudal médio galgado em cada estrutura de estudo;
- Interpretar os resultados obtidos com esta ferramenta.

Avaliação do risco:

- Identificar o tipo de atividades realizadas nas zonas de proteção das estruturas marítimas;
- Estabelecer valores de caudal médio admissível para cada uma das secções a analisar;
- Aplicar a metodologia de avaliação do risco de galgamento, através da determinação dos graus de probabilidade e de consequência de ocorrência de galgamento.;
- Elaborar um mapa de risco, representativo das secções críticas das estruturas marítimas do Porto de Leixões.

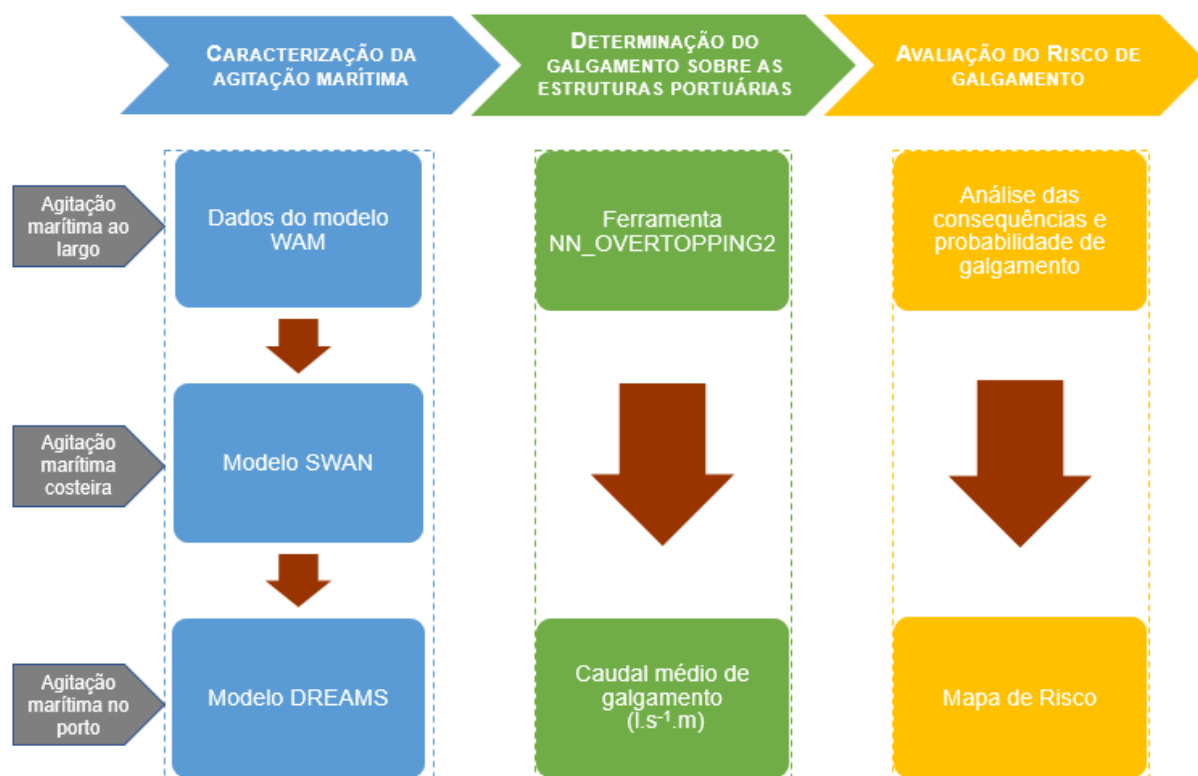


Figura 1.1 - Metodologia para a avaliação do risco de galgamento aplicada para o Porto de Leixões.

1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos, cujos conteúdos serão sucintamente descritos.

O primeiro capítulo apresenta o enquadramento da dissertação, onde se realiza uma breve exposição introdutória do tema, objetivos e estruturação.

No segundo capítulo caracteriza-se o fenómeno de galgamento, enfatizando os fatores condicionantes principais, como o regime de agitação marítima, o nível de maré e as características físicas das estruturas marítimas. Posteriormente são descritas metodologias de cálculo de galgamento, nomeadamente o uso de ferramentas neuronais artificiais, apresentando-se uma descrição pormenorizada da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2, utilizada na presente dissertação, bem como recomendações sobre valores admissíveis de galgamento para diferentes situações.

No capítulo 3 faz-se um enquadramento geral sobre o conceito de avaliação de risco em estruturas portuárias, incidindo-se na descrição da metodologia adotada para a realização deste estudo.

O capítulo 4 introduz o caso de estudo, o Porto de Leixões, descrevendo-se detalhadamente as diferentes estruturas marítimas e instalações portuárias, assim como as atividades desenvolvidas nas zonas de proteção das estruturas alvo do presente estudo. Posteriormente neste capítulo são analisados alguns estudos efetuados no âmbito da segurança e operacionalidade do Porto de Leixões, registando-se dados significativos do regime de agitação marítima local, bem como aspetos sensíveis do porto, com interesse para os objetivos do presente estudo.

O quinto capítulo é representativo do estudo que sustenta os resultados desta dissertação, apresentando-se os dados utilizados sobre o regime de agitação marítima, fornecidos pelo modelo WAM, utilizados na modelação da agitação marítima recorrendo aos modelos SWAN e DREAMS. Para cada modelo utilizado, são apresentadas as condições de aplicação adotadas e a análise dos resultados obtidos. Posteriormente, são indicadas as condições de aplicação da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2, descrevendo-se as características fundamentais de cada estrutura em estudo, culminando no cálculo do caudal médio de galgamento sobre as mesmas.

No sexto capítulo é aplicada a metodologia de avaliação do risco de galgamento, recorrendo aos resultados da ferramenta neuronal. São apresentados os resultados referentes aos graus de probabilidade, consequência, e risco de ocorrência de galgamentos nas estruturas estudadas, culminando na apresentação do mapa de risco para o Porto de Leixões, com indicação dos locais de maior sensibilidade em termos de segurança e operacionalidade do porto.

Finalmente, a dissertação conclui com o capítulo 7, apresentando-se os resultados deste estudo e possíveis desenvolvimentos futuros, sumarizando-se as principais conclusões retiradas do estudo desenvolvido nesta dissertação, bem como algumas orientações e sugestões a aplicar em eventuais trabalhos a realizar no mesmo âmbito.

2. O FENÓMENO DE GALGAMENTO

2.1. Introdução

A propagação das ondas é condicionada por diversos fenómenos físicos como, por exemplo, os fenómenos associados às variações batimétricas do fundo, à existência de obstáculos, à presença de correntes longitudinais ou transversais à costa, à dissipação de energia por rebentação de ondas, atrito de fundo ou por percolação no fundo, à interação entre ondas e/ou ondas-correntes (Neves, 2009).

Com efeito, à medida que as ondas se aproximam da costa e se verificam alterações na batimetria do fundo, ocorre a modificação da velocidade e da direção de propagação da onda (refração) e uma redistribuição da energia ao longo das cristas (difração). A diminuição da profundidade é geradora de um aumento da instabilidade da onda que culmina na rebentação, fenómeno que provoca a dissipação de energia da onda (Lourenço, 2016).

Por outro lado, quando se verifica a incidência de uma onda sobre uma estrutura marítima, parte da sua energia é refletida para o largo (reflexão), sendo que outra é dissipada através de vários processos físicos (por rebentação, percolação e por atrito) e a restante é transmitida através (transmissão) ou sobre a estrutura (espraiamento e /ou galgamento) (Lourenço, 2016).

Ao escoamento desenvolvido sobre o talude da estrutura dá-se o nome de espraiamento. O galgamento é caracterizado pelo transporte de uma massa de água sobre o coroamento de uma estrutura e que se verifica quando a energia de uma onda incidente é de tal ordem elevada que o nível de água na face da estrutura excede a sua cota máxima, denominada por cota de coroamento. (Patrício, 2012).

O cálculo do espraiamento e do galgamento são fundamentais para o dimensionamento das estruturas marítimas, pois condicionam a cota de coroamento destas estruturas. Consoante a funcionalidade prevista para a estrutura, a cota do coroamento será dimensionada considerando a admissibilidade de ocorrer galgamento (i.e., se o caudal de galgamento não excede o valor considerado como admissível) ou não.

A avaliação de galgamento mostra-se um exercício algo complicado, uma vez que o galgamento é um fenómeno de distribuição desigual no tempo e no espaço em que a quantidade de água transposta em cada onda é consideravelmente variável. Como facilmente se entende, ondas maiores têm capacidade de impulsionar maiores volumes de água sobre o coroamento da estrutura (Pullen et al., 2007). É precisamente o carácter aleatório da agitação marítima que torna difícil controlar por completo a ocorrência dos fenómenos de galgamento. Por esta razão, admite-se usualmente no dimensionamento de obras marítimas que estas possam ser galgadas por uma determinada percentagem de ondas incidentes.

Os galgamentos são expressos sobre a forma de volume de água que galga sobre a estrutura (m^3 ou l), ou através do caudal médio por metro linear de estrutura que passa sobre a cota de coroamento da mesma, q ($m^3/s/m$ ou $l.s^{-1}/m$). Em termos concretos, e devido à complexidade do fenómeno de galgamento, não existe um caudal constante a atravessar o coroamento da estrutura. Importa referir que o volume galgado associado apenas a uma onda pode ser 100 vezes maior do que a média dos volumes galgados medidos durante uma tempestade. Daí se definir o galgamento como a média do caudal de galgamento de um estado de mar, onde se incluem grandes caudais devido à passagem de ondas de grande altura e caudais nulos devido à interação de ondas de menor altura (Patrício, 2012).



Figura 2.1 - Ocorrência do fenómeno de galgamento no molhe norte do porto de Leixões, a 20 de fevereiro de 2014 (Bairrão, 2014).

Segundo Pullen et al, (2007), de acordo com a forma de dissipação de energia das ondas e o modo como estas transpõem a estrutura, consideram-se três tipos de galgamento, podendo verificar-se galgamento por espraio denominado por lâmina de água ou “*green water*”, ou seja, quando o nível de espraio é superior à cota de coroamento e se forma uma lâmina contínua de água que passa por cima da estrutura. O galgamento poderá ocorrer também sob a forma de salpicos, quando a onda rebenta sobre o talude exterior da estrutura, denominando-se de “*splash*” e, de uma forma menos significativa, quando transpõe a estrutura em forma de borrifos transportados pelo vento, definida como “*spray*” (Pullen et al., 2007), figura 2.2.



Figura 2.2 -Exemplos de fenómenos de galgamento no quebra-mar norte do porto de Leixões, do tipo salpicos (a) e lâmina de água (b). (fotos de Zacarias Pereira da Mata, retirado de www.dreamstime.com, 2017).

2.2. Fatores condicionantes

Apresenta-se seguidamente a descrição dos fatores considerados capazes de condicionar o fenómeno de galgamento, na interação onda-estrutura. São eles a agitação marítima, o nível da água do mar, assim como as características físicas intrínsecas da estrutura de defesa, nomeadamente geometria da estrutura e ângulo de incidência da onda na estrutura.

2.2.1. Agitação marítima

Frequentemente são registados episódios de forte agitação marítima na costa portuguesa, originada no Atlântico Norte, e desenvolvendo-se no sentido Oeste – Este (Lourenço, 2016). Sendo a agitação marítima um fator condicionante do fenómeno de galgamento, torna-se fulcral analisar os fenómenos de alteração deste fator, ao longo da propagação desde o largo até às zonas costeiras. As características de agitação marítima observadas ao largo da costa podem assumir-se como idênticas numa larga extensão, contrastando com as características de agitação junto à costa, uma vez que esta se encontra influenciada pelos fundos e recorte da própria costa, diferindo de local para local (Pombo, 2016).

A agitação marítima é condicionada por vários parâmetros que lhe conferem complexidade e irregularidade a cada instante. Deste modo, para a caracterização da agitação marítima é essencial esclarecer o conjunto de parâmetros que influenciam a propagação das ondas. Analisando o perfil no espaço de uma onda genérica (figura 2.3), denomina-se por cava a parte baixa situada abaixo do nível de maré da superfície livre e, por crista, a parte mais acima do nível de repouso. A diferença entre uma crista e uma cava adjacente é designada por altura de onda, H , e a distância entre duas cristas ou cavas consecutivas é designada por comprimento de onda, L . A declividade da onda, s , relaciona a altura e o comprimento de onda.

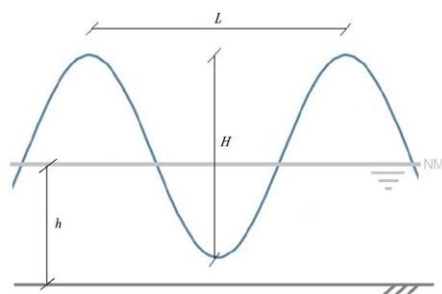


Figura 2.3 - Perfil de onda genérica (Adaptado de Beirão et al., 2014).

Assim, a agitação marítima pode caracterizar-se através dos seguintes parâmetros (Pereira, 2013):

- Altura da onda – distância na vertical entre a crista e a cava da onda:
 - Altura máxima ($H_{máx}$) – altura máxima observada no período em análise;

- Altura significativa (H_s) – média do terço das ondas com maior altura registadas no período em análise.
- Período da onda – intervalo de tempo entre a passagem de duas cristas (ou cavas) consecutivas por um determinado ponto:
 - Período médio (T_m) – média dos períodos observados, num determinado tempo;
 - Período de pico (T_p) – período correspondente à frequência com maior densidade espectral.
- Direção da onda – direção medida em relação ao norte geográfico, no sentido dos ponteiros do relógio:
 - Direção média (θ_m) – média ponderada da direção de propagação das ondas;
 - Direção de pico (θ_p) – direção associada ao sistema de ondas predominantes.

A profundidade, h , é também um fator importante na caracterização das ondas, uma vez que ao atingirem águas de menor profundidade, a sua forma e direção têm tendência a variar. O período mantém-se constante com a diminuição da profundidade, diminuindo a velocidade e o comprimento de onda que, conseqüentemente, provoca o aumento da altura de onda e declividade da mesma (Pereira, 2013).

Para além dos parâmetros referidos anteriormente, a forma como a onda rebenta sobre a estrutura também se reflete no tipo de galgamento (Pombo, 2016). A ação da onda sobre a estrutura, assim como alguns dos seus efeitos, pode ser representada pelo número de *Iribarren*, ξ , que relaciona o ângulo do talude da fronteira sólida, α , com a declividade da onda, s , obtendo-se ξ de acordo com a equação (2.1).

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s}} \quad (2.1)$$

Relativamente à influência do ângulo de incidência das ondas (β) no fenómeno de galgamento, geralmente, quanto maior for o ângulo menor será o efeito de galgamento, consequência do aumento do processo de refração sofrido pelas ondas, reduzindo a altura de onda na propagação. Às ondas com incidência normal à estrutura corresponde um valor de β de 0° (Lourenço, 2016).

A altura de onda significativa e o respetivo período significativo, para as ondas ao largo da costa Oeste portuguesa, são em comum de 2 m a 2.5 m e de 9 s a 11 s, com proveniência dos quadrantes WNW e NNW e geradas por ventos de altas latitudes do Atlântico Norte. Na costa Oeste, o mar calmo é uma exceção, enquanto as ondas ultrapassam com frequência os 5 m de altura significativa ao largo, entre outubro e março (Coelho, 2005).

2.2.2. Nível de maré

O nível de maré é um fator condicionante no fenómeno de galgamento, estando a sua variação associada à atração pelo Sol e pela Lua sobre a terra (maré astronómica) e a mecanismos de circulação meteorológicos.

A probabilidade de ocorrência de galgamento é maior quanto mais elevado for o nível de maré, ou seja, quando ocorre a preia-mar. Uma vez que neste caso, a diferença entre a cota de coroamento do quebra-mar e o nível da água é menor, havendo menor área para ocorrer a dissipação de energia da onda quando esta colide com a estrutura (Lourenço, 2016).

A variação do nível do mar em relação à oscilação periódica previsível da maré astronómica é designada por sobre-elevação meteorológica, a qual resulta de um forçamento atmosférico associado à passagem de tempestades caracterizadas por uma grande depressão atmosférica e ventos fortes. A forte agitação marítima que chega à costa portuguesa é, na maior parte dos casos gerada por tempestades extratropicais que se formam no Atlântico Norte, desenvolvendo-se de Oeste para Este com elevado *fetch* (área de geração das ondas). Os ventos persistentes e concentrados no núcleo das tempestades formam largas áreas de atrito entre o mar e a atmosfera, potenciando valores elevados de geração de ondas de *swell*. (Antunes, 2014).

Um exemplo do tipo de tempestades extremas foi o caso da tempestade Hércules a 6 de janeiro de 2014, gerando ondas de 20 m de altura e 20 a 23 segundos de período, que atingiram fortemente a costa ocidental da Europa continental, incluindo a Península Ibérica, com danos consideráveis nas zonas costeiras (Antunes, 2014).

A informação do nível de maré pode ser obtida com base em leituras de marégrafos (instrumentos que medem a variação do nível das águas num determinado local e em função do tempo, incluem a maré astronómica e a sobrelevação meteorológica) e através da previsão da maré astronómica (calculada pela análise de séries de observações de ondas harmónicas; ainda se tem de adicionar a sobrelevação meteorológica) (Lourenço, 2016).

2.2.3. Características das estruturas

Os quebra-mares estudados nesta dissertação têm a finalidade de proteger as infraestruturas portuárias, constituindo um obstáculo à propagação normal das ondas e dissipando a energia das mesmas através da entrada da onda no seu interior e da rebentação da agitação no próprio talude. Assim, a construção destas defesas físicas, permitem a criação de uma zona de acalmia possibilitando a proteção das infraestruturas portuárias, a realização de operações de atracagem e de movimentação de cargas, bem como a navegação segura de embarcações de recreio.

O dimensionamento e forma geométrica destas estruturas podem variar, dependendo do tipo de função a desempenhar, das características da agitação marítima, do nível médio da água do mar,

ou das características do local de implementação. A figura 2.4 representa um esquema do perfil de um quebra-mar de talude, identificando-se as respectivas partes constituintes e suas funções (Pereira, 2013), figura 2.4:

- **Núcleo:** zona interior de enchimento, usualmente constituída por enrocamento de todo o tamanho (T.O.T.); a sua permeabilidade influencia de forma significativa a estabilidade do manto e o seu galgamento;
- **Submanto:** zona de transição entre o manto resistente e o núcleo, constituída por uma ou mais camadas de enrocamentos, de pesos iguais ou diferentes, com o intuito de evitar a remoção do material do núcleo e aumentar a porosidade do talude;
- **Manto resistente:** camada exterior do talude, onde a incidência das ondas é direta;
- **Superestrutura:** bloco de betão ou alvenaria, em geral maciço, onde se situa o coroamento, sendo a sua cota máxima determinante no comportamento da estrutura.

Relativamente à constituição dos mantos da maioria dos quebra-mares de talude, estes apresentam blocos artificiais de betão, uma vez que são dotados de um bom comportamento hidráulico, dada a sua permeabilidade e rugosidade (γ_f), possibilitando o aumento da absorção da energia da onda incidente, e conseqüentemente a redução da reflexão e do caudal médio de galgamento (Fabião, 2012).

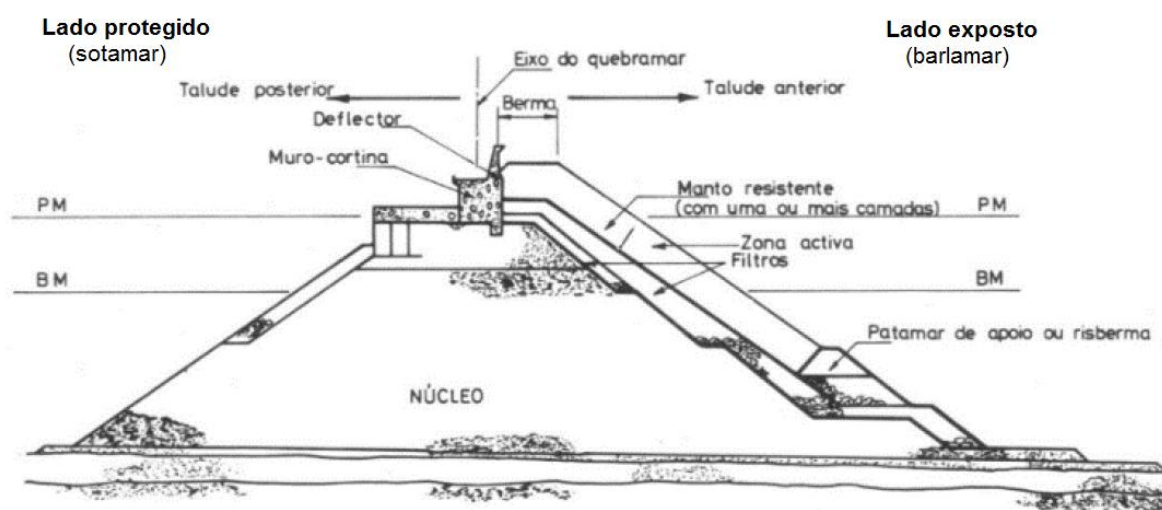


Figura 2.4 – Esquema de um perfil representativo de um quebra-mar de talude (adaptado de Lourenço, 2016).

Respeitante aos aspetos geométricos da estrutura de defesa, estes são determinantes na mitigação do galgamento. De seguida, identificam-se os parâmetros geométricos com relevância para o presente estudo, de uma estrutura marítima tipo (figura 2.5).

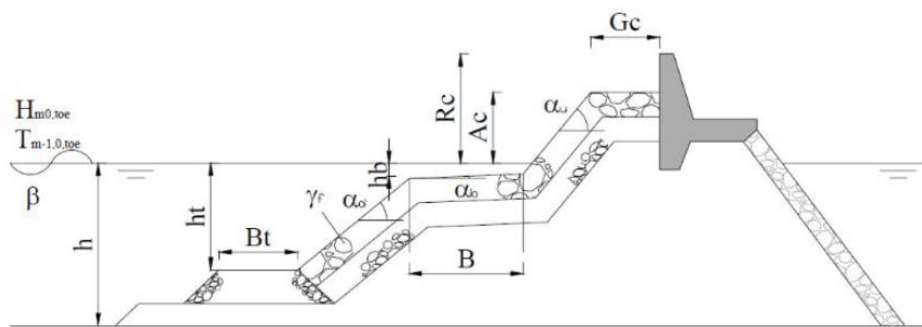


Figura 2.5 - Parâmetros relevantes na geometria de uma estrutura de defesa (Coeveld et al., 2007).

O parâmetro mais condicionante deste tipo de estrutura é a definição da cota de coroamento (R_c) (figura 2.5), uma vez que o seu subdimensionamento pode levar a galgamentos indesejáveis enquanto o seu sobredimensionamento minimiza a ocorrência de galgamento, mas leva a custos adicionais de material, de mobilização de equipamento e de mão-de-obra, podendo implicar também impactos visuais e ambientais indesejados (Rodrigues, 2014).

Outro parâmetro para mitigar o galgamento é o aumento da berma de coroamento (G_c), que representa a distância entre o meio da berma de coroamento e o nível da água (A_c).

As bermas da estrutura (B) e de pé de talude (B_t), também permitem diminuir o galgamento, através da definição dos parâmetros das alturas de água na berma da estrutura (h_b) e na berma de pé de talude (h_t), respetivamente e ainda pela introdução de inclinação (α_b). A onda incidente rebenta de acordo com a sua geometria que pode ser alterada modificando o ângulo de inclinação do talude (α_d e α_u) (Lourenço, 2016).

Outro dos fatores que pode influenciar o galgamento é o ângulo de incidência das ondas na estrutura, (β), que é avaliado pelo ângulo entre a direção de propagação da onda e a direção perpendicular à estrutura (figura 2.6).

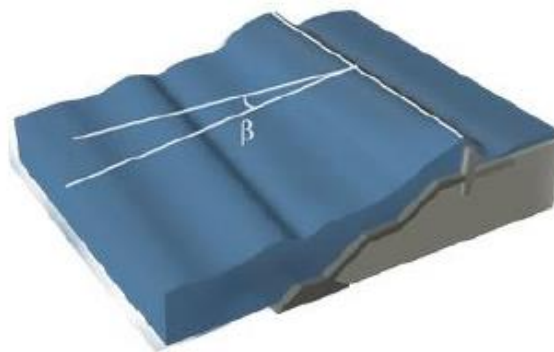


Figura 2.6 - Ângulo entre a direção de propagação da onda e a normal à estrutura (Patrício, 2012).

Uma das formas mais eficazes na redução do galgamento é dissipar a energia da onda incidente, através da sua rebentação ou do seu espraçamento (deve-se alterar o perfil da estrutura pela imposição de um elemento ou pelo aumento da largura do coroamento) (Lourenço, 2016). Deste modo, devem-se definir os parâmetros constituintes dos quebra-mares de modo criterioso, uma vez que podem implicar uma diminuição significativa do fenómeno de galgamento.

2.3. Metodologias de cálculo de galgamento

2.3.1. Introdução

Em rigor, a análise do galgamento deveria ser feita utilizando metodologias desenvolvidas e aplicadas especificamente para cada caso de estudo. No entanto, tornando-se um processo moroso e dispendioso, a melhor solução passa por utilizar, em fase de Estudo Prévio de uma estrutura, metodologias baseadas em situações semelhantes ensaiadas em laboratório e, em fase de Projeto de Execução, a utilização de modelação física específica (Neves, 2010).

Tal como descrito anteriormente, o fenómeno de galgamento é um fenómeno de análise complexa, estimado através do caudal médio por metro linear de estrutura que passa sobre a cota de coroamento da mesma, expresso em $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ou $\text{l.s}^{-1}/\text{m}$.

O galgamento de estruturas portuárias pode ser estimado através de (Brito, 2007):

- Expressões empíricas;
- Modelos físicos;
- Modelos numéricos;
- Ferramentas neuronais.

Relativamente às expressões empíricas, o seu uso é mais direccionado para o galgamento de estruturas simplificadas, que não contêm peculiaridades estruturais. Apesar de ser um método rápido e económico, estão limitadas a um número restrito de configurações, sendo que a sua aplicação a estruturas mais complexas requerem extrapolações, o que, por vezes, leva a uma discrepância de resultados. Estas expressões dependem dos parâmetros que condicionam o fenómeno, nomeadamente, os relacionados com o clima de agitação e a geometria da estrutura (Brito, 2007).

Os modelos físicos constituem até ao momento a melhor ferramenta de avaliação do galgamento, sendo os seus resultados utilizados em estudos de protótipo e no desenvolvimento calibração e validação de outros métodos de cálculo. Contudo, a modelação física é dispendiosa, morosa, exige infraestruturas e equipamento muito específico e requer ainda uma elevada experiência de quem realiza os ensaios e analisa os seus resultados (Reis e Neves, 2010).

Os modelos numéricos são uma alternativa mais eficiente aos modelos físicos, que podem ser utilizados em diversas situações dentro da sua gama de aplicabilidade, mediante as apropriadas condições iniciais ou fronteira (Lourenço, 2016). No entanto, tem de ser convenientemente calibrados e validados.

Finalmente, as ferramentas neuronais (ferramenta utilizada no âmbito desta dissertação) são métodos expeditos para a avaliação do galgamento que em sede de Estudo Prévio são muitas vezes utilizadas. No entanto, não fornecem a indicação sobre a distribuição espacial do caudal galgado na zona atrás da estrutura. Neste trabalho, utilizou-se a ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al., 2005) baseada em redes neuronais e desenvolvida no âmbito do projeto europeu CLASH.

2.3.2. Redes neuronais artificiais

As ferramentas neuronais têm a capacidade de lidar com dados imprecisos tendo elevada fiabilidade nos resultados de galgamento. Estas ferramentas distinguem-se dos restantes métodos pelas vantagens que apresentam, tais como (Rodrigues, 2014):

- Capacidade de prever o caudal médio galgado em perfis de estruturas mais complexas do que as usualmente contempladas pelas fórmulas empíricas/semi-empíricas;
- Determinação de intervalos de confiança para as estimativas do caudal médio galgado;
- Influência dos efeitos de modelo e de escala na estimativa correspondente ao protótipo;
- Possibilidade de impor uma diversidade de parâmetros de entrada.

Na base desta ferramenta estão as redes neuronais, que se assemelham ao sistema nervoso central humano, uma vez que os neurónios artificiais computacionais tentam reproduzir e modelar algumas das características biológicas do mesmo. Cada neurónio possui várias entradas a que estão associados pesos. Um somador efetua a soma ponderada das entradas e na saída deste, encontra-se uma função não-linear. As redes contêm vários neurónios ligados para que as saídas de uns estão ligadas às entradas de outros (Brito, 2007).

O uso de redes neuronais tem tido um papel importante na determinação do galgamento, especialmente em fase de Estudo Prévio (Reis e Neves, 2010). Como exemplo, estes autores referem a ferramenta NN_OVERTOPPING2 (e.g., van Gent et al., 2005), baseada na análise de redes neuronais e desenvolvida no âmbito do Programa Europeu CLASH (Coeveld et al., 2005; van der Meer et al., 2005; van Gent et al., 2005). Em paralelo com mesmo projeto, Verhaeghe (2005) desenvolveu a ferramenta neuronal Overtopping 631 Predictor v1.1 na Universidade de Gent, Bélgica (Fortes et al., 2015). As diferenças mais notórias entre as duas ferramentas estão relacionadas com o número de testes de galgamentos e algoritmos matemáticos usados no treino e teste das

ferramentas. A principal mais-valia proporcionada pela ferramenta Overtopping Predictor v1.1 é a sua capacidade em identificar condições de agitação marítima incidentes na estrutura que conduzem a situações de galgamento nulo (Fortes et al., 2015).

Com efeito, recorreu-se ao uso da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al., 2005) para a presente dissertação, que permite o cálculo do caudal médio galgado através da integração de informação relativa às características físicas das estruturas marítimas, assim como às características de agitação marítima. Esta ferramenta foi desenvolvida no âmbito do projeto Europeu CLASH pela Delft Hydraulics, resultando da análise de 700 redes neuronais baseadas em 8400 combinações de input-output provenientes de ensaios em modelo físico, realizados em diferentes laboratórios da Europa, América e Japão, para diversas características da agitação e diferentes tipos de estruturas, tais como, quebra-mares de talude, de estrutura mista e verticais (Bravo, 2012). A utilização desta ferramenta teve como base um manual dedicado a prestar orientações sobre o uso da ferramenta.

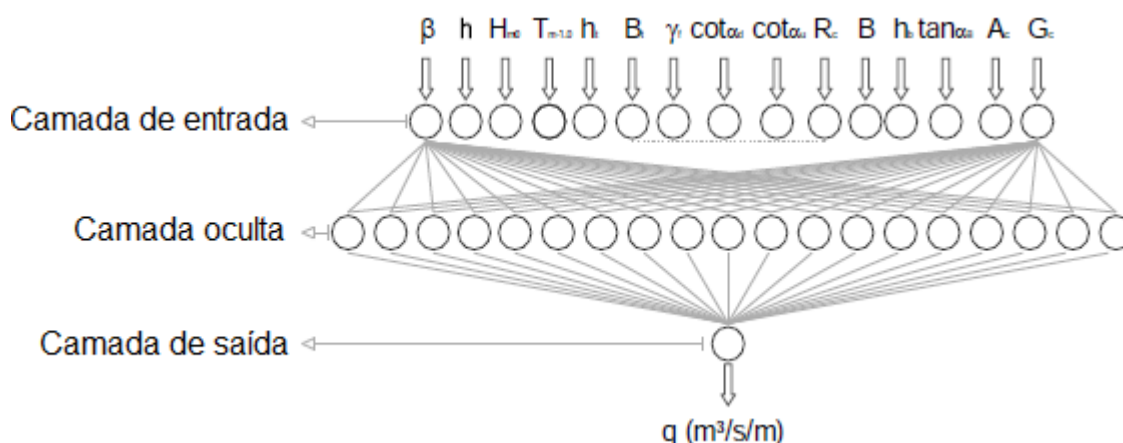


Figura 2.7 - Esquema representativo de uma rede neuronal artificial de três camadas, NN_OVERTOPPING2 (adaptado de Van Gent, 2007).

As 700 redes neuronais estão dispostas em camadas (figura 2.7), sendo a primeira designada por camada de entrada, onde se representam as 15 variáveis de entrada. Estas variáveis representam as características de agitação marítima (H_{m0} , t_{oe} , $T_{m-1,0}$ t_{oe} e β) e as características físicas da estrutura (h , h_t , h_b , B_t , B , γ_f , α_d , α_b , α_u , R_c , A_c , G_c), num total de 3 e 12 parâmetros de entrada respetivamente.

Os 3 parâmetros para descrever a agitação marítima são:

- H_{m0} , t_{oe} – Altura de onda significativa no pé (base) da estrutura. Este parâmetro é equivalente à altura de onda significativa (H_s), sendo necessário à determinação deste parâmetro, definir o valor da altura significativa máxima, $H_{smáx}$, limita o H_s de acordo com a profundidade uma vez que a variação decrescente da profundidade afeta a rebentação da onda, fazendo com que a mesma rebente antes de atingir a costa.

Desta forma, utiliza-se uma relação empírica para considerar apenas o valor de H_s até 0,78 da profundidade da água (equação (2.2)), caso contrário utiliza-se $H_{Smáx}$ como H_s (equação (2.3)).

$$H_{Smáx} = 0,78 \times (NM + \text{Cota Batimétrica Projeto}) \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} \text{Se } H_s < H_{Smáx} \rightarrow H_{s_corrig} = H_s \\ \text{Se } H_s \geq H_{Smáx} \rightarrow H_{s_corrig} = H_{Smáx} \end{cases} \quad (2.3)$$

- $T_{m-1,0 \text{ toe}}$ - Período médio de onda na base da estrutura. Este parâmetro está relacionado com o período de pico (T_p) através da equação (2.4).

$$T_{m-1,0 \text{ toe}} = \frac{T_p}{1.1} \quad (2.4)$$

- B' – Ângulo entre a direção de propagação da agitação e a normal à estrutura. A figura 2.8 apresenta um esquema representativo deste parâmetro, ilustrando também o ângulo de incidência da onda em relação ao norte é (θ'), e o ângulo da normal à estrutura em relação ao norte (α'). Uma vez que o NN_OVERTOPPING2 considera ângulos entre 0° e 90° , considera-se a equação (2.5) no cálculo deste parâmetro.

$$\begin{cases} \text{Se } \theta' \leq \alpha' \rightarrow \beta' = \alpha' - \theta' \\ \text{Se } \theta' > \alpha' \rightarrow \beta' = \theta' - \alpha' \end{cases} \quad (2.5)$$

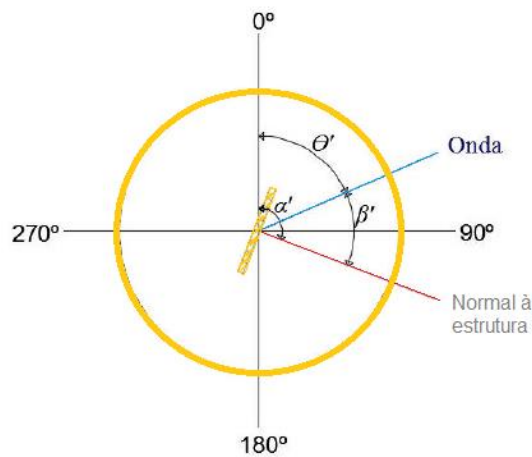


Figura 2.8 - Representação do parâmetro B' .

Os 12 parâmetros que descrevem a geometria da estrutura são:

- $h, h_t, h_b, B_t, B, \gamma_f, \alpha_d, \alpha_b, \alpha_u, R_c, A_c, G_c$
- **h [m]**: Parâmetro que descreve a altura de água junto à estrutura, ou seja, a altura de água imediatamente em frente à estrutura;
- **h_t [m], B_t [m]**: Parâmetros que descrevem a profundidade de água na banquetta de fundo e a largura do pé de talude da estrutura. No caso específico de não existir banquetta de fundo, o valor de profundidade de água na banquetta de fundo é igual à profundidade de água imediatamente em frente à estrutura ($h_t = h$);
- **B [m], h_b [m], $\tan \alpha_b$ [-]**: Parâmetros que descrevem a berma da estrutura: B é a largura, medida horizontalmente; h_b é a profundidade de água na berma, medida no centro desta. Caso a berma esteja acima do nível de água h_b é negativo e se h_b for horizontal, $\tan \alpha_b = 0$;
- **R_c [m], A_c [m], G_c [m]**: Parâmetros que descrevem a parte superior da estrutura. R_c é a distância entre o nível de repouso e o coroamento da estrutura, ou seja, é o distanciamento, medido verticalmente, entre o nível de maré e o ponto mais elevado da estrutura; A_c é a distância entre o nível de repouso e a berma do coroamento da estrutura, isto é, a distância, medida verticalmente, do nível da água ao ponto mais alto do talude da estrutura; G_c é a largura da berma de coroamento. Caso o muro cortina seja construído na estrutura, G_c é a largura dos blocos em frente ao elemento do coroamento;
- **$\cot \alpha_d$ [-], $\cot \alpha_u$ [-]**: Parâmetros que descrevem os declives da estrutura. $\cot \alpha_d$, $\cot \alpha_u$ são as cotangentes dos declives na parte central da estrutura sob ($\cot \alpha_d$ descendente) e sobre ($\cot \alpha_u$ ascendente) a berma respectivamente;
- γ_f [-]: Parâmetro representativo da rugosidade e permeabilidade da estrutura, de acordo com a tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Valores do coeficiente de rugosidade e permeabilidade, para determinados tipos de materiais (adaptado de Coeveld et al, 2005).

Tipo de material	γf
Superfície lisa e impermeável	1
Enrocamento	0,5
Cubos com duas camadas	0,5
Cubos com uma camada	0,52
Cubos Antifer	0,5
Acropódes	0,49
X - Blocks	0,49
Core-locs	0,47
HARO'S	0,47
Tetrápodes	0,4
Dolos	0,43
Seabeas	0,5

A figura 2.9 representa um esquema de um exemplo de perfil de uma estrutura, onde estão identificados os 15 parâmetros referidos neste subcapítulo.

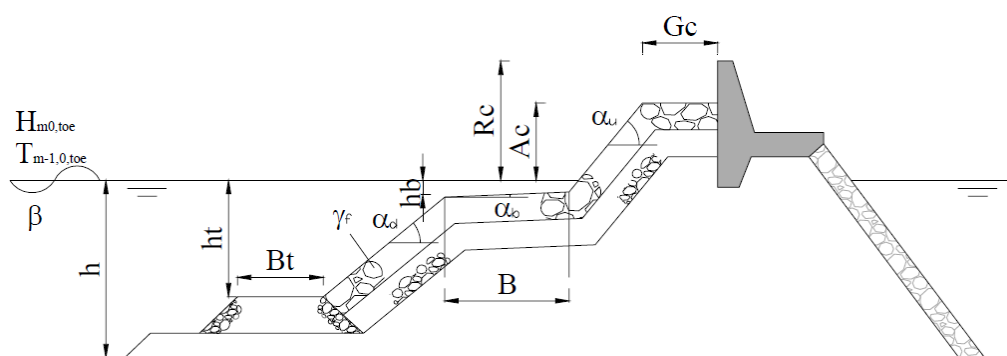


Figura 2.9 - Exemplo de perfil de uma estrutura marítima, com identificação dos 15 parâmetros associados à geometria da mesma (Coeveld et al, 2005).

Os resultados da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 são os valores de caudais médios galgados para cada trecho da estrutura marítima em estudo, definida com base em 12 parâmetros

geométricos definidos acima. Os resultados de galgamento são expostos em intervalos de confiança de 2,50%, 5%, 25%, 50 %, 75%, 95% e 97,5%.

No ficheiro de resultados gerado por esta ferramenta, são indicados números de observação respeitantes a cada cálculo, compreendidos entre 0 e 7, que refletem determinadas condições de galgamento em cada resultado gerado, sendo que para o caso de caudais inferiores a 10^{-6} l.s⁻¹/m, aplica-se a equação (2.6) para estimar o caudal médio de galgamento.

$$Q = q / \sqrt{gH_s^3} \quad (2.6)$$

2.4. Limites admissíveis para galgamentos em estruturas marítimas

O correto dimensionamento e construção de estruturas marítimas resulta na maior dissipação da energia da onda, diminuindo os efeitos da mesma, quer sobre a estrutura, quer nas zonas de proteção assegurada pela estrutura. No entanto, qualquer estrutura marítima, aquando em fase de projeto, é dimensionada para admitir um certo valor de galgamento. Por sua vez, o valor de galgamento admissível, está dependente das consequências económicas da inundação originada pelo galgamento, da natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada pela estrutura, do perfil da estrutura galgada e da necessidade de garantir a segurança de pessoas e infraestruturas localizadas no local (Reis et al., 2011).

Os valores limite de galgamento admissíveis no presente estudo, refletem as indicações de Pullen et al., (2007), que estipula estes valores tendo em consideração a segurança/operacionalidade de estruturas (quadro 2.1), pessoas (quadro 2.2), veículos (quadro 2.3), e equipamentos e edifícios (quadro 2.4).

Quadro 2.1 - Valores admissíveis do caudal médio de galgamento admissível para as estruturas marítimas (adaptado de Pullen et al., 2007).

Tipos de estruturas	Condições e Tipo de Danos	Caudal médio q [l.s ⁻¹ /m]
Estruturas de defesa com talude no tardo	Danos significativos ou afundamento de grandes navios.	50 - 200
	Afundamento de navios pequenos localizados entre 5 e 10 m da estrutura. Danos em grandes navios.	1 - 10
	Danos em edifícios.	0,1

Tipos de estruturas	Condições e Tipo de Danos	Caudal médio q [$\text{l.s}^{-1}/\text{m}$]
Defesas frontais	Danos em equipamento localizado entre 5 e 10 m da estrutura.	200
	Danos em equipamento localizado entre 5 e 10 m da estrutura.	50

Quadro 2.2 - Valores admissíveis do caudal médio de galgamento admissível para pessoas (adaptado de Pullen et al., 2007).

Condições e Tipo de Danos ⁽¹⁾	Caudal médio q [$\text{l.s}^{-1}/\text{m}$]
Pessoal treinado, com equipamento e calçado adequado, com perceção de se pode molhar, galgamento gera escoamentos de pouca altura, sem jatos de água a cair, perigo reduzido de queda para o mar.	1 - 10
Pessoas cientes, com visão clara do mar, que não ficam facilmente perturbadas ou assustadas, capazes de tolerar o facto de ficarem molhadas, que se deslocam numa zona larga.	0,1
Pessoas totalmente desprevenidas, que não conseguem observar a agitação incidente, que podem facilmente ficar assustadas ou perturbadas, com vestuário inadequado para se molharem ou que se desloquem numa zona estreita ou propícia a tropeções e quedas.	0,03

⁽¹⁾Estas condições não têm de ocorrer em simultâneo.

Quadro 2.3 - Valores admissíveis do caudal médio de galgamento para circulação de veículos (adaptado de Pullen et al., 2007).

Condições e Tipo de Danos	Caudal médio q [$\text{l.s}^{-1}/\text{m}$]
Circulação a baixa velocidade, galgamento gera escoamentos de pouca altura (<i>pulsating overtopping</i>), sem jatos de água a cair na via, veículo não imerso.	10 – 50 ⁽²⁾
Circulação a velocidade moderada ou alta, galgamento projetado com grande velocidade (<i>impulsive overtopping</i>) ou com jatos de água a cair na via que podem imergir o veículo.	0,01 – 0,05 ⁽³⁾

⁽²⁾ Limites relacionados com o galgamento efetivo obtido na via de circulação.

⁽³⁾ Limites relacionados com o galgamento obtido na estrutura marítima, assumindo que a via de circulação se encontra imediatamente atrás da estrutura.

Quadro 2.4 - Valores admissíveis do caudal médio de galgamento para navios, equipamentos e edifícios na zona abrigada da estrutura (adaptado de Pullen et al., 2007).

Condições e Tipo de Danos	Caudal médio q [l.s ⁻¹ /m]
Danos significativos ou afundamento de grandes navios.	50
Afundamento de navios pequenos localizados entre 5 e 10 m da estrutura. Danos em grandes navios.	10 ⁽⁴⁾
Danos em edifícios.	1 ⁽⁵⁾
Danos em equipamento localizado entre 5 e 10 m da estrutura.	0,4 ⁽⁴⁾

⁽⁴⁾ Limites relacionados com o galgamento obtido na estrutura marítima.

⁽⁵⁾ Limites relacionados com o galgamento efectivo obtido no edifício.

Analisando os quadros apresentados acima, verifica-se que a gama de valores admissíveis varia entre 0,03 e 200 l.s⁻¹/m (caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura), referente à garantia de segurança humana e estruturas marítimas, respetivamente.

Refere-se ainda que nas recomendações de Pullen et al, (2007) é sugerida uma regra para o cálculo do caudal efetivo de galgamento a uma distância (entre 5 e 25m) do coroamento da estrutura galgada, através da equação (2.7). Esta equação permite o cálculo de galgamento afeto a alguns pontos de interesse (como vias de circulação, equipamentos ou edifícios) que se encontram localizados a uma certa distância da estrutura de defesa.

$$q_x = \frac{q}{x} \quad (2.7)$$

Pela expressão acima, temos que “q” representa o caudal médio galgado verificado no coroamento da estrutura, e “q_x” o galgamento a uma distancia “x” do coroamento da estrutura galgada.

3. AVALIAÇÃO DO RISCO DE GALGAMENTO

3.1. Introdução

Os métodos para a avaliação do risco associado ao galgamento têm vindo a ser cada vez mais utilizados, uma vez que os mapas de risco resultantes destes métodos, garantem informações corretas e úteis para a tomada de decisão das entidades responsáveis. No processo de avaliação de risco para estruturas portuárias, os eventos perigosos traduzem-se muitas vezes em inundações ou galgamentos ocorridos devido à ação das ondas, sendo as consequências destes eventos o principal foco destas avaliações.

Por uma questão de simplificação, o risco pode ser avaliado a partir do valor do grau de probabilidade de ocorrência do acontecimento perigoso (numa escala de probabilidades de ocorrência previamente definida) e do grau de consequências (noutra escala que reflete os prejuízos associados à ocorrência de acontecimentos perigosos), conforme a equação (3.1) (Poseiro et al., 2013):

$$\text{Grau de Risco} = \text{Grau de probabilidade} \times \text{Grau de consequências} \quad (3.1)$$

Todos os procedimentos para a avaliação de risco estão assentes na mesma base metodológica, que combina os valores de probabilidade de ocorrência de um dado evento perigoso com os valores de consequências dessa mesma ocorrência.

Este capítulo tem o intuito de expor os conceitos primários da avaliação do risco em portos, assim como a base metodológica adotada no presente estudo.

3.2. Risco, vulnerabilidade e resiliência portuária

Sendo o estudo sobre o potencial risco de galgamento no porto de Leixões, o tema da presente dissertação, abordam-se seguidamente os conceitos de risco, vulnerabilidade e resiliência portuária, cuja compreensão é essencial para a problemática abordada.

Relativamente ao conceito de risco, este pode ser considerado como a probabilidade de ocorrer um determinado evento perigoso e consequente estimativa das consequências sobre pessoas, bens ou ambiente, de forma direta ou indireta (Ferreira, 2016). O conceito de risco é, portanto, o culminar da combinação entre a probabilidade de um acontecimento perigoso, ou passível de causar dano, e as suas consequências para o local em questão (Lourenço, 2016).

Os portos marítimos, devido à sua localização costeira, estão expostos a eventos extremos, estando a sua capacidade de resposta assente em adotar medidas preventivas sobre os possíveis impactos. Estes impactos são especialmente importantes no contexto logístico, uma vez que podem

resultar em interrupção das atividades portuárias (Chhetri et al., 2015). Deste modo, os portos marítimos podem ser vulneráveis a estes tipos de perigo, estando este fator influenciado pela capacidade destes sistemas em lidar e adaptarem-se às adversidades causados por eventos climáticos extremos (IPCC, 2016).

Consequentemente, a resiliência de determinado sistema pode ser definida pela sua capacidade de organização, durante e após um evento perigoso, minimizando os efeitos nefastos do mesmo (Ferreira, 2016). Para Hosseini e Barker (2016) a resiliência de um sistema portuário pode ser associada a três fatores essenciais: a capacidade de absorção, relacionada com a consciencialização dos riscos e redução de vulnerabilidade, a capacidade de adaptação, relacionada com adaptação temporária para manter as actividades portuárias em pleno, e a capacidade de recuperação, que reflete predisposição de um porto em recuperar após um evento extremo. Segundo o estudo realizado por Reppeto et al (2017), as estratégias portuárias utilizadas para diminuir a vulnerabilidade do sistema, mostraram-se significativamente mais rentáveis que as estratégias de recuperação após a ocorrência de um evento climático extremo.

Neste quadro, a avaliação do risco apresenta-se como uma ferramenta crucial para a gestão portuária, sendo este conceito definido pelo processo complexo de traduzir a magnitude de determinado risco, ajudando na definição de medidas e tomadas de decisão capazes de mitigar o risco, ou aumentar a sua tolerabilidade (Lourenço, 2016). Para Ferreira (2016) a “complexidade” da definição do risco prende-se pela incerteza que lhe é intrínseca, ou seja a sua difícil previsibilidade, podendo ser mitigado, controlado ou contornado, mas dificilmente eliminado na sua totalidade.

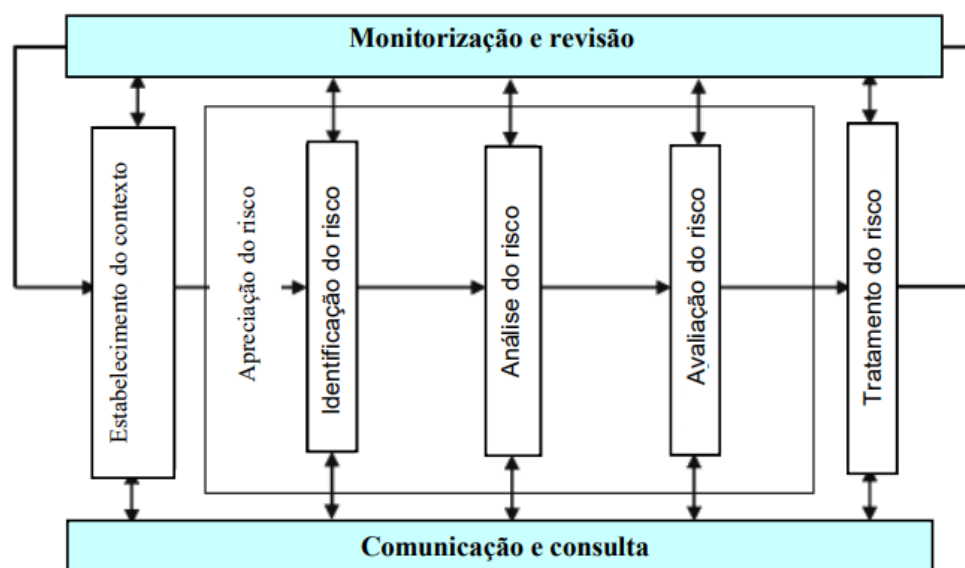


Figura 3.1 - Processo de gestão do risco (adaptado de NP ISO 31000:2013).

Segundo as orientações presentes na norma ISO 31000:2013 para a gestão do risco (figura 3.1), este deverá ser identificado e analisado, aferindo sobre a sua natureza e magnitude, e posteriormente avaliado e tratado, de modo a identificar e aplicar as medidas necessárias para a sua prevenção. Segundo esta norma, é essencial monitorizar o risco de modo a possibilitar a contínua adaptação dos portos aos eventos climáticos extremos, a fim de tornar as atividades portuárias mais resilientes aos mesmos.

3.3. Metodologia Adotada

A metodologia desenvolvida pelo LNEC, designada por metodologia simples, foi utilizada por Reis et al, (2011) e Neves et al, (2012) com o objetivo de se avaliar o risco associado à ocorrência de galgamentos em estruturas de defesa portuária.

Esta metodologia, resume-se a cinco passos fundamentais:

1. Avaliação do grau de probabilidade de ocorrência de valores de caudal médio galgado que excedam os limites pré-estabelecidos;
2. Determinação do grau das consequências da ocorrência de galgamentos que excedam os limites pré-estabelecidos;
3. Cálculo do grau de risco através do produto dos graus atribuídos à probabilidade e às consequências de ocorrência de galgamentos que excedam os limites pré-estabelecidos;
4. Avaliação da aceitabilidade do grau de risco obtido;
5. Obtenção de mapas de risco.

Relativamente à determinação do grau de probabilidade de ocorrência, é utilizada uma escala de graus de probabilidade de ocorrência de galgamentos acima de um dado valor, apresentada no quadro 3.1. Os limiares são definidos com base nas diretivas de Pullen et al, (2007), já referidas na secção 2.4 e têm em conta a natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada pela estrutura, o perfil da estrutura galgada e a necessidade de garantir a segurança de pessoas e infraestruturas nessa zona.

Os valores de probabilidade indicados em Pullen et al, 2007 foram calculados com recurso ao método de simulação Monte Carlo, em que a distribuição estatística destes valores é classificada segundo classes, ou graus, de probabilidade. Deste modo, um grau de probabilidade 1, corresponde à probabilidade de ocorrência de galgamentos superiores aos limites estipulados não superior a 2%,

ou seja, apresenta um período de retorno de 50 anos, indicando que é expectável verificar-se galgamento sobre determinada estrutura, pelo menos uma vez em 50 anos.

Quadro 3.1 - Graus de probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis (adaptado de Poseiro et al, 2013).

Grau	Descrição	Probabilidade de ocorrência
1	Improvável	0 - 1%
2	Raro	1 - 10%
3	Ocasional	10 - 25%
4	Provável	25 - 50%
5	Frequente	>50%

No quadro 3.2 apresenta-se um guia de orientação referente às consequências de ocorrência de determinado evento, que apresente valores de caudal médio de galgamento superiores a limites previamente estabelecidos.

Quadro 3.2 - Grau de consequências associadas à ocorrência de um acontecimento perigoso (adaptado de Poseiro, 2013).

Consequências (Guia de Orientação)								
Grau	Descrição	Pessoas	Ambiente	Gestão portuária	Edifícios	Equipamentos	Estrutura	Veículos
1	Insignificantes	Possibilidade de ferimentos muito ligeiros	Impacto ambiental desprezável	Alterações ligeiras nas atividades portuárias	Danos exteriores quase inexistentes	Danos quase inexistentes	Dano na zona ativa da estrutura não necessitando de reparação	Danos quase inexistentes
2	Reduzidas	Uma única lesão ligeira	Pequenos derrames (por exemplo de combustível)	Algumas alterações nas atividades portuárias; má publicidade para o porto a nível local	Danos interiores e exteriores insignificantes	Danos ligeiros que não implicam a paragem do equipamento; resolução de problemas quase imediata	Ocorrência de movimentos e quedas de blocos sem exposição de filtros; reparação imediata desnecessária	Danos insignificantes que não afetam a sua utilização
5	Sérias	Múltiplas lesões ligeiras ou uma única lesão grave	Algumas áreas com acesso proibido devido a poluição causada por derrames	Operações de carga e descarga condicionadas; possibilidade de paragem parcial do porto; má publicidade generalizada	Danos interiores moderados	Danos que implicam inatividade temporária do equipamento para reparação	Ocorrência de movimentos e quedas de blocos com exposição de filtros; superestrutura afetada, mas sem movimentos significativos	Danos sérios com consequências na sua utilização, mas que não levam à sua paragem temporária
10	Muito sérias	Muitas lesões graves ou uma perda de vida	Episódios de poluição dentro e fora do porto com possibilidade de consequências irreparáveis para o ambiente	Impossibilidade de realização de operações de carga e descarga durante vários dias; má publicidade a nível nacional	Grandes danos no interior; estrutura do edifício afetada	Danos graves; inatividade prolongada do equipamento	Filtros afetados; movimentos substanciais da superestrutura	Danos exteriores sérios com consequências na sua utilização que levam a uma paragem prolongada
25	Catastróficas	Muitas perdas de vidas	Derrames generalizados; contaminação muito grave; consequências irreparáveis para o ambiente; necessidade de ajuda internacional;	Restrições muito sérias às operações de carga e descarga durante muito tempo; perda de trocas comerciais durante muito tempo; má publicidade internacional	Danos interiores muito graves; estrutura do edifício seriamente afetada; colapso iminente	Perda do equipamento (reparação impossível)	Colapso da estrutura	Danos sérios inviabilizando a sua utilização em definitivo

O grau de risco é determinado com base na equação (3.1), sendo que o quadro 3.3 define a aceitabilidade do grau do risco. É de notar que os limites correspondentes aos graus nas tabelas de probabilidade e de consequências, bem como o próprio número de graus, são simples guias de orientação que devem refletir as características do problema em análise (Fortes et al., 2014).

Quadro 3.3 - Aceitabilidade do grau de risco (Fortes et al., 2014).

							Grau	Descrição	Controlo do risco (Guia de orientação)
GRAU DE RISCO		Consequências					1 - 3	Insignificante	Risco desprezável; não é preciso levar a cabo medidas de controlo de risco
Probabilidade de Ocorrência	1	1	2	5	10	25	4 - 10	Reduzido	Risco que pode ser considerado aceitável/tolerável caso se selecione um conjunto de medidas para o seu controlo, possíveis danos materiais de pequena dimensão
	2	2	4	10	20	50			
	3	3	6	15	30	75			
	4	4	8	20	40	100	15 - 30	Indesejável	Risco que deve ser evitado se for razoável em termos práticos; requer uma investigação detalhada e análise de custo-benefício; é necessário a monitorização
	5	5	10	25	50	125			
							40 - 125	Inaceitável	Risco intolerável; implica proceder ao controlo do risco (e.g. eliminar a origem dos riscos, alterar a probabilidade de ocorrência e/ou as consequências, transferir o risco, etc))

Finalmente, para a quantificação do grau de risco, multiplica-se o grau de probabilidade pelo grau de consequência, que é analisado através de um quadro representativo dos limites de aceitabilidade do grau de risco, dando origem a mapas de risco.

Relativamente à determinação das características da agitação marítima ao largo e em áreas costeiras e portuárias, estas baseiam-se na acoplagem de um conjunto de modelos numéricos de previsão da agitação marítima e da sua propagação até à zona de estudo (Fortes et al., 2015). Os parâmetros que determinam as características de agitação marítima, quer em zona portuária quer em zona costeira são:

- Altura de onda significativa (H_s);
- Período de onda (T_m ou T_p);
- Direção média do período de pico ($(\theta_m$ ou $\theta_p)$).

Estas variáveis são obtidas a partir de séries temporais longas fornecidas ao largo da zona de estudo, através de modelos numéricos de previsão de agitação marítima à escala regional - Modelo WAM (Hasselmann et al., 1988).

Os dados obtidos pelo modelo anterior, providenciaram a informação necessária à aplicação de outros modelos numéricos, indicados para estimar a propagação da agitação marítima desde o largo até junto à costa – Modelo SWAN (Booij et al., 1999) – e até ao interior do porto de estudo – Modelo DREAMS (Fortes et al., 2002).

Deste modo, possibilita-se a avaliação dos galgamentos e inundações em zonas costeiras e infraestruturas portuárias, sendo que (Fortes et al., 2015):

- Em zonas costeiras, os valores do espraimento (*runup*) e consequente galgamento e/ou inundação, recorrendo a fórmulas empíricas baseadas em medições de campo e em ensaios em modelos físicos reduzidos. A cota de inundação é obtida pela soma do espraimento com o nível de maré (maré astronómica e sobrelevação meteorológica);
- Em zonas portuárias, os valores do caudal médio galgado com recurso a ferramentas baseadas na aplicação de redes neuronais artificiais (ferramentas neuronais).

No caso específico da presente dissertação, e uma vez que o seu foco é a avaliação de risco de galgamento para o porto de Leixões, adotou-se o uso de ferramentas neuronais, concretamente a ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al., 2005), que consiste num procedimento de transformação de 15 parâmetros de entrada, explicado posteriormente.

A metodologia descrita já foi aplicada com sucesso em diferentes locais em Portugal, nomeadamente na praia de Vale do Lobo, no Algarve (Raposeiro et al., 2013), na praia de São João da Caparica, na Costa da Caparica (Neves et al., 2013), no porto de Sines (Neves et al., 2012), na baía e porto da Praia da Vitória, na ilha Terceira, Açores (Poseiro et al, 2013), e no porto de Ponta Delgada, ilha de São Miguel nos Açores (Pereira, 2013).

4. INTRODUÇÃO AO CASO DE ESTUDO – PORTO DE LEIXÕES

4.1. Caracterização geral do porto

O porto de Leixões encontra-se situado no Norte de Portugal, na foz do rio Leça, a aproximadamente 4,5 km a Norte da embocadura do Rio Douro. É abrangido pelo concelho de Matosinhos, distrito do Porto (figura 4.1).



Figura 4.1 - Localização geográfica do porto de Leixões (Instituto geográfico português, ftp.igeo.pt, consultado em agosto de 2017).

Este porto começou por ser essencialmente uma bacia destinada ao abrigo ou refúgio de navios com destino ao porto comercial do Douro, que muitas vezes se tornava inacessível devido à violência dos temporais marítimos ou pelas grandes cheias do rio Douro (Cruz, 1993).

A decisão sobre a localização do porto recaiu na foz do rio Leça, devido às ótimas condições naturais aí presentes, nomeadamente as características do próprio rio que, por ser um rio pequeno, apresentava pouco volume de sólidos transportados. Este fator contrastava com o rio Douro, que

transportava um grande volume de material sólido, obrigando a constantes desassoreamentos. Outra das virtudes deste local era a existência de formações rochosas descrevendo um semicírculo, que formava, praticamente, um porto natural. Estas formações rochosas acabaram por dar o nome a este novo porto de abrigo – Leixões (Dias, 2009).

No ano de 1895 dá-se o início da construção de dois extensos molhes (molhes norte e sul) sobre os leixões naturais existentes, bem como um quebra-mar localizado no extremo do molhe norte. Durante a construção dos molhes, e para ajudar na movimentação dos blocos graníticos, utilizaram-se dois guindastes, batizados por Titãs (figura 4.2), que ainda hoje permanecem no porto de Leixões e que, devido à sua singularidade mundial e importância na construção do porto, apresentam importância patrimonial a preservar.



Figura 4.2 - Construção do porto de Leixões (1884 - 1892) - Titãs de Leixões, localizados na extremidade dos molhes norte e sul (Ferreira, 2009).

Após a construção dos dois molhes, o porto de Leixões passou a significar uma alternativa viável em relação ao antigo porto fluvial do Douro. No entanto, devido às condições extremas do mar, representadas por grandes vagas e tempestades violentas, o molhe norte era constantemente galgado, resultando em redução de estabilidade e segurança do mesmo. Este fato levou a que fosse necessária a construção de um quebra-mar submerso (entre 1932 e 1940), localizado em frente à extremidade do quebra-mar norte (figura 4.3) (Dias, 2009).



Figura 4.3 - Estruturas de defesa do porto de Leixões (adaptado de Google Earth).

Com uma maior estabilidade em termos de agitação marítima no interior do porto, é aprovado em 1955 o Plano de Ampliação do Porto Comercial, que marcou profundamente o desenvolvimento do porto de Leixões (Dias, 2009), aproveitando-se o vale do rio Leça para prolongar e modernizar o complexo portuário existente.

Nos finais dos anos 60 surge o Terminal de Petroleiros com a função de abastecer a refinaria de Leça, assim como se inicia a construção de docas e cais acostáveis indicados para receber navios de pesca, duplicando a capacidade de receber embarcações até então (Dias, 2009). Posteriormente, são construídos vários terminais no interior do porto, nomeadamente um terminal de contentores, uma marina para embarcações desportivas e de recreio (figura 4.4) e um porto de pesca (figura 4.5), que foram sofrendo alterações de ampliação ao longo do tempo.



Figura 4.4 - Doca de Recreio, localizada no enraizamento do Molhe Norte do Porto de Leixões (fonte:APDL, 2017).



Figura 4.5 – Porto de pesca do porto de Leixões (fonte: APDL, 2017).

Já em 2003, em concordância com as diretrizes estipuladas no Plano Estratégico de Desenvolvimento do Porto de Leixões, fixaram-se 21 ações de desenvolvimento no porto, com o intuito de serem implementadas até ao ano de 2015, sendo as melhorias das condições operacionais no Terminal de Petroleiros e a revitalização do molhe sul e zonas adjacentes, as mais urgentes para a autoridade portuária. Assim, procederam-se a mudanças profundas no molhe sul, nomeadamente a ampliação do espaço portuário, a criação de um terminal multiusos para o desenvolvimento do segmento de mercado *rol-on/rol-off*, e a construção de um ambicioso terminal de cruzeiros, com o objetivo de desenvolver os segmentos de mercado de transporte de passageiros. O Terminal de Cruzeiros Sul (figura 4.6) localiza-se no molhe sul do porto de Leixões, caracterizando-se como o maior projeto de sempre desde a abertura do porto (APDL, 2017), permitindo receber os maiores navios de cruzeiro e aumentando significativamente o fluxo de passageiros no porto.



Figura 4.6 -Terminal de Cruzeiros sul do porto de Leixões (APDL, 2017).

Na figura 4.7 está representada a planta atual do porto de Leixões, com a identificação das instalações mais relevantes pertencentes ao mesmo.

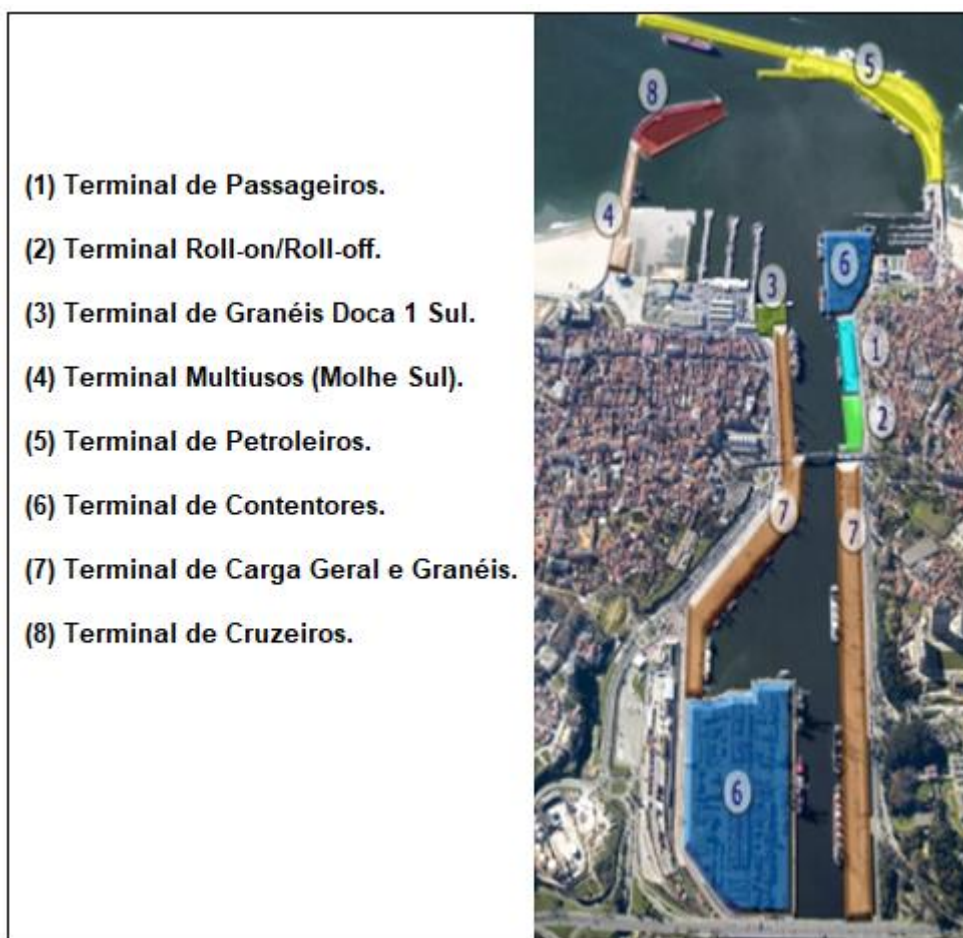


Figura 4.7 - Terminais existentes no porto de Leixões (adaptado de APDL, 2017).

Tendo o presente estudo como objetivo principal a avaliação de galgamento sobre as estruturas de defesa do porto de Leixões, a consequente avaliação de risco será direcionada para o quebra-mar norte e para o molhe sul, uma vez que os mesmos são os únicos com incidência direta da agitação marítima. Estas estruturas englobam as instalações referentes ao terminal de petroleiros (quebra-mar norte), e aos terminais de cruzeiros e multiusos (molhe sul), estando a avaliação de risco dependente do tipo de operações portuárias realizadas nestes locais.

Seguidamente, apresenta-se uma caracterização minuciosa das estruturas e instalações de maior relevância para o presente estudo, bem como a importância das atividades realizadas nas mesmas, para a logística portuária de Leixões.

4.2. Caracterização das estruturas marítimas e instalações portuárias

4.2.1. Terminal de Petroleiros

Dos vários terminais existentes no porto de Leixões, destaca-se o terminal de petroleiros, atualmente concessionado à *Galp Energia*. Este terminal é uma instalação destinada essencialmente a operações de carga e descarga de petróleo bruto, e seus derivados, sendo posteriormente direcionados para a refinaria de Matosinhos, através de condutas com cerca de 2 km de comprimento. Este terminal, localizado ao longo de todo o quebra-mar norte e com cerca de 1,6 km de comprimento, é composto por três postos de acostagem, nomeadamente os postos “A”, “B” e “C” (figura 4.8).



Figura 4.8 - Vista aérea do porto de Leixões (adaptado de Google Earth).

O Posto “A”, com localização à entrada do porto de Leixões, perto da cabeça do quebra-mar norte (ver figura 4.9), encontra-se protegido da ação direta da agitação marítima por um quebra-mar que foi inicialmente projetado e construído como uma estrutura submersa (1940), tendo sido posteriormente transformado num quebra-mar de taludes (1969) (Rosa-Santos, 2010).



Figura 4.9 - Manto resistente da cabeça do quebra-mar norte (arquivo APDL, 2012 in Castro, 2015).

O quebra-mar norte apresenta-se como a primeira proteção contra a agitação marítima advinda do Atlântico, estando a zona do posto A protegida por um manto resistente com 5 m de espessura, constituído por tetrápodes com 40 tf e duas subcamadas constituídas por blocos de 20 e 40 tf. Este terminal apresenta fundos de -15 m (ZHL), garantindo a segurança de navegação para navios petroleiros com peso bruto máximo de 100 000 t. As mercadorias movimentadas neste terminal são referentes a ramas de petróleo e produtos refinados diversos.



Figura 4.10 - Posto "A" do terminal de petroleiros. Destaque para o método de acostagem em duque d'Alba (imagem à direita) (APDL, 2016).

Os postos "B" e "C" estão localizados numa área interior do porto de Leixões, distanciando 145m da estrutura de defesa (denominada por proteção exterior do molhe norte), que é constituída por uma parede vertical e um manto de blocos artificiais de 45 tf. Nesta zona, a agitação marítima não é tão influente como no posto "A". Ainda comparativamente com o posto "A", os postos "B" e "C" apresentam fundos mais reduzidos, com cotas de -10 m (ZHL) e -6 m (ZHL), respetivamente. Podem receber navios com peso bruto máximo de 27 000 t e 5 000 t, postos "B" e "C" respetivamente, estando a movimentação de mercadorias destinada a produtos refinados diversos, gases de petróleo liquefeitos e produtos aromáticos. A figura 4.11 representa em pormenor os postos "B" e "C", identificando-se o afastamento existente entre os mesmos e a proteção exterior do quebra-mar norte, bem como o oleoduto de ligação com a refinaria de Matosinhos.



Figura 4.11 - Postos "B" e "C" do Terminal de petroleiros (fonte: APDL, 2017).

Neste terminal inclui-se ainda uma área com tanques para recepção de refugos, fluxos e outros produtos (figura 4.12), assim como equipamentos e edifícios necessários às atividades diárias deste terminal, nomeadamente:

- Portaria do terminal;
- Edifício administrativo;
- Edifício da central de bombagem de movimentação de produtos;
- Edifício da central de bombagem da rede de incêndios,
- Edifício das duas caldeiras a diesel;
- Posto de recepção e de transformação de energia elétrica.

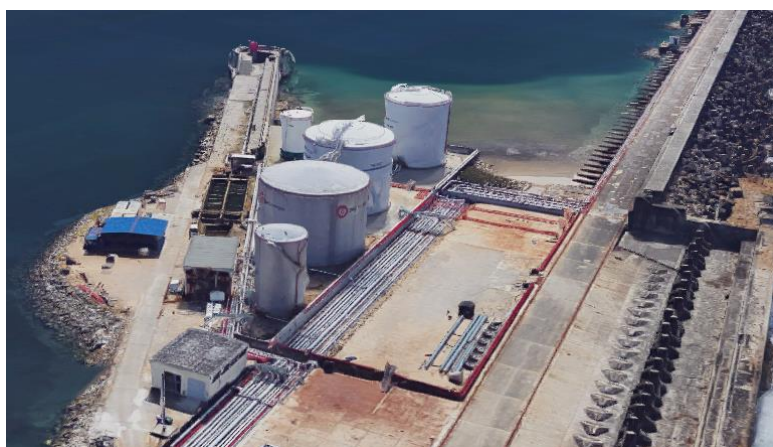


Figura 4.12 - Tanques de armazenagem, edifícios e equipamentos localizados no Terminal de petroleiros, entre os postos "A" e "B" (adaptado de Google Earth).

Salienta-se a existência de um corredor circulável neste terminal (ver figura 4.13), acessível apenas a funcionários autorizados e treinados para as funções a desempenhar, assim como a circulação de veículos



Figura 4.13 - Conduitas existentes no Terminal de petroleiros e corredor circulável ao longo do quebra-mar norte (imagem à direita) (fonte: Jornal de notícias 2015).

Ainda referente ao Terminal de Petroleiros, menciona-se ainda a existência de um quebra-mar submerso, localizado em frente à cabeça do quebra-mar norte (figura 4.14).



Figura 4.14 – Localização do quebra-mar submerso em frente ao manto exterior da cabeça do quebra-mar norte do porto de Leixões. (Rosa-Santos, 2010).

Os quebra-mares submersos têm como função provocar a rebentação das ondas através do coroamento a uma cota inferior à cota mínima previsível em baixa-mar. No entanto, estas estruturas são menos eficientes que os quebra-mares de taludes, uma vez que apenas provocam a rebentação das ondas de maior altura, não tendo o objetivo de absorver a totalidade da energia resultante da rebentação. É assim limitada a altura de onda máxima que pode atingir uma outra estrutura principal adjacente a este tipo de quebra-mares, permitindo que as outras sejam aligeiradas (Teixeira 2012).

4.2.2. Terminal de Cruzeiros

O terminal de cruzeiros localiza-se no molhe sul do porto de Leixões, intersectando uma zona onde existe o enrocamento de grandes dimensões, que constitui o próprio molhe, com profundidade variável até 15 m. O novo Terminal de Cruzeiros (figura 4.15) é denominado como o maior projeto de sempre desde a abertura do porto de Leixões (APDL, 2017), tendo sido inaugurado em abril de 2011 e fazendo com que o porto se assumia cada vez mais como um porto de cruzeiros. Apesar do cais dedicado a receber navios de cruzeiro ter sido inaugurado em 2011, só em 2015 foi concluída a construção do edifício central.



Figura 4.15 – Cais acostável do terminal de cruzeiros do porto de Leixões (APDL, 2017).

Neste terminal estão presentes estruturas dedicadas à movimentação de passageiros, como cais acostáveis para receber navios de cruzeiro e áreas utilizadas para transportar passageiros desde os navios cruzeiro, até ao exterior do porto de Leixões, destacando-se:

- O edifício central (figura 4.16), que se apresenta como a principal estrutura do novo terminal de cruzeiros, com dimensões em planta de cerca de 98 m por 75 m e com uma altura aproximada de 30 m, perfazendo um total de 4 andares. No topo do edifício existe um local próprio de lazer, formando um miradouro virado a sul (ver figura 4.16).

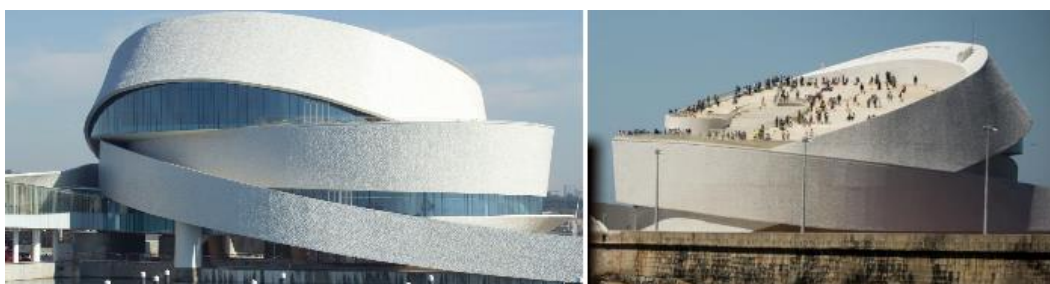


Figura 4.16 – Edifício central do terminal de cruzeiros, e miradouro no topo do mesmo (imagem à direita) (APDL, 2017).

Este edifício dispõe de uma Estação de Passageiros, localizada no piso térreo, com diversas valências para navios em escala, possuindo capacidade para 2 500 passageiros em *turnaround* (embarque e desembarque). A movimentação de passageiros desde o interior até ao exterior do porto, é assegurada por veículos preparados para o efeito (ver figura 4.17). Neste edifício encontram-se ainda localizados os Departamentos de Produção de Ciência (gabinetes e laboratórios experimentais) e de Divulgação Científica do CIIMAR - Centro Interdisciplinar de

Investigação Marinha e Ambiental, e havendo anfiteatros para a concretização de palestras e conferências.



Figura 4.17 - Estação de passageiros no terminal de cruzeiros. Exemplo de tipologia dos veículos de transporte de passageiros (APDL, 2017).

- Um cais com 340 m de comprimento e 18 m de largura, com fundos de -10 m (Z.H.L), permitindo a atracagem de embarcações até 300 metros de comprimento. Neste cais está presente uma manga de acesso aos navios de cruzeiro (figura 4.18) com 145 m de comprimento e apoiada no cais acostável, tendo o objetivo de permitir a circulação protegida dos passageiros, entre os navios acostados e o edifício da estação terminal.

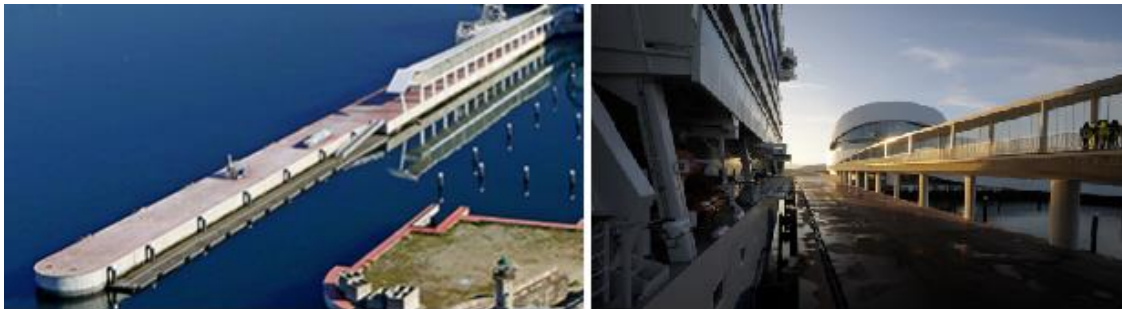


Figura 4.18 – Cais de atracagem (imagem à esquerda) e manga de acesso aos navios (imagem à direita) (APDL, 2017).

- Uma doca de recreio náutico (figura 4.19) com capacidade para atracar 170 embarcações, contendo uma plataforma para serviços de manutenção, cais de recepção e um edifício com instalação de apoio aos navegantes. Esta doca aproveita o espaço existente entre o cais de atracagem e o talude em curva do molhe sul. O acesso à doca de recreio é realizado por um passadiço com 130 m, proveniente do edifício central.



Figura 4.19 - Doca de recreio do Terminal de cruzeiros (APDL, 2017).

4.2.3. Terminal multiusos

O Terminal Multiusos (figura 4.20) destina-se essencialmente ao tráfego Ro-Ro (*roll on, rol off*) ao armazenamento de contentores. Situando-se numa zona mais interior do Porto de Leixões, dispõe de um cais avançado com 310 m de comprimento, de uma rampa Ro-Ro com 26 m de largura, e fundos a -10 m (Z.H.L.). Dispõe ainda de um cais perpendicular ao Molhe Sul com 155m de comprimento e fundos a -10m.



Figura 4.20 - Terminal multiusos do porto de Leixões (APDL, 2017).

Este terminal apresenta ainda um cais flúvio-marítimo para acostagem de embarcações direcionadas para proporcionar itinerários turísticos no rio Douro.

Considerando a localização deste terminal numa zona abrigada no interior do porto, não se preveem consequências de galgamento nefastas para as atividades realizadas no mesmo. No entanto, será essencial estudar o efeito de galgamento ao longo do molhe sul, correspondente à zona circulável que liga o terminal de cruzeiros ao terminal multiusos, utilizada para o transporte de passageiros até ao exterior do porto, e acesso pedonal ao edifício central (ver figura 4.21).



Figura 4.21 - zona circulável na ligação entre os terminais de cruzeiros e multiusos (adaptado de Google Earth).

4.3. Eventos de temporal no porto

Devido à localização do porto de Leixões na costa oeste portuguesa, o regime de agitação marítima é muito energético, estando este porto sujeito a condições de temporal, sobretudo nos meses de inverno, originados no Atlântico Norte (Castro, 2015).



Figura 4.22 - Evento de temporal com galgamentos significativos junto ao posto A, no Terminal de Petroleiros de Leixões. (foto de Zacarias Pereira da Mata, www.dreamstime.com, consultado em Agosto de 2017).

O estudo realizado por Coelho (2005), apresenta uma caracterização da agitação marítima ao largo do porto de Leixões, identificando também as condições de temporal existentes. Os dados utilizados neste estudo, foram baseados nos registos da boia ondógrafo, pertencente ao Instituto Hidrográfico (IH), e instalada ao largo do porto de Leixões (tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Localização das estações ondógrafo de Leixões ao longo do tempo (Adaptado de Coelho, 2005).

Período das observações	Profundidade (m)	Latitude (N)	Longitude (W)
Out. 1981 a jan. 1985	30	41° 10' 42''	8° 44' 48''
Jul. 1993 a jul. 1996	110	41° 12' 12''	9° 05' 18''
Jul. 1996 a dez. 2003	83	41° 19' 00''	8° 59' 00''

Estes equipamentos permitem obter dados de agitação marítima que permitem calcular parâmetros, tais como altura de onda significativa (H_s), altura de onda máxima ($H_{m\acute{a}x}$), período de onda médio (T_z), período de onda máximo ($T_{m\acute{a}x}$) e direção média de propagação das ondas (θ_m), sendo esta informação armazenada pelo Instituto Hidrográfico de 3 em 3 h, durante períodos de 30 m. Tendo por base os dados destas estações, Coelho (2005), considerou que os registos com intervalos de recolha inferior a 3h e altura significativa de onda superior a 3 m seriam situações de temporal, admitindo ainda a presença de temporal persistente, quando se registavam pelo menos dez registos deste tipo a ocorrerem durante um período superior a 8h.

A tabela 4.2 expõe a contagem de registos em condição de temporal, efetuados pelas estações ondógrafo de Leixões, fazendo parte de um total de 25708 registos de agitação marítima destas estações.

Tabela 4.2 - Número de registos em condições de temporal persistente, efetuados nos diferentes meses do período entre 1981 e 2003 (dados do Instituto Hidrográfico para a boia de Leixões) (Adaptado de Coelho, 2005).

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Σ
1981												85	85
1982													0
1983													0
1984													0
1985	17												17
1993										57		17	74
1994	20	100										87	207
1995	18												18
1996				7							72		79
1997					3						145		148
1998				101					20		30	221	372
1999	67	36	59	12					57	108		98	437
2000	59	54		38									151
2001													0
2002	112	104	3		16						35	86	356
2003	55	43	47	13						55	54	6	273
Σ	348	337	109	171	19	0	0	0	77	220	336	600	2217

Com base no estudo realizado por Coelho (2005), e tendo por base os dados presentes na tabela 4.2, constata-se que o mês de dezembro é aquele onde se verifica maior número de registos de temporal (cerca de 27%), não havendo registo de temporais em junho, julho e agosto. Os anos de 1993, 1998 e 1999 são os que verificam maiores percentagens de temporal, face ao total de registos contabilizados (em condição de bom tempo, e em temporal). No total de 25708 registos, 8.6% são em situação de temporal, sendo que doze destes com duração superior a 48h (Coelho, 2005). O temporal registado com maior duração (164 h), ocorreu entre 26 de dezembro de 1998 e 1 de janeiro de 1999. Neste período, o valor máximo de altura de onda significativa foi de 8.89 m e o valor médio foi de 5.31 m. Contudo, realça-se a existência de falhas nas series de registos, devido a problemas associados ao registo de dados da boia.

A figura 4.23, representativa da direção média de onda registada pela boia de Leixões, permite constatar que este parâmetro apresenta um padrão definido, quando se registam situações de temporal persistente.

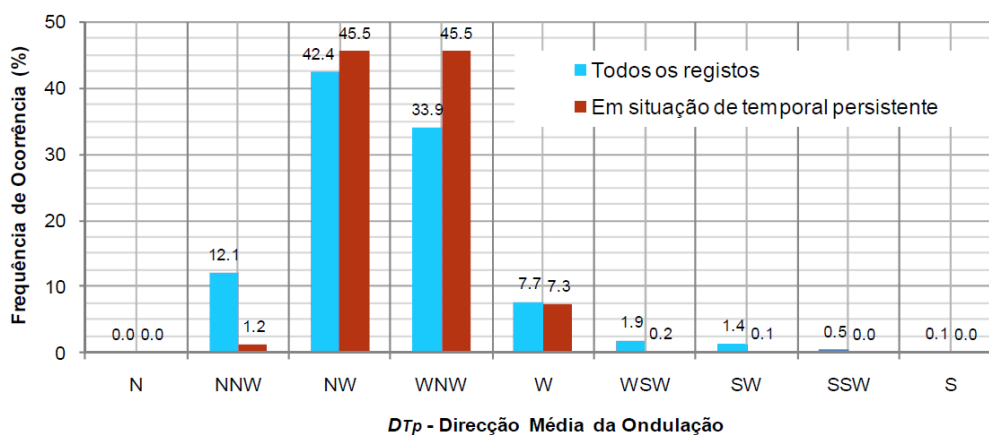


Figura 4.23 - Comparação da direção média anual da ondulação com a direção associada às situações de temporal persistente (dados do Instituto Hidrográfico para a boia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003), (adaptado de Coelho, 2005, in Rosa-Santos, 2010).

De facto, em situação de temporal, os quadrantes noroeste (NW) e oeste-noroeste (WNW) representam 91% do total de registos, registando-se uma diminuição das ondas geradas a partir do quadrante Oeste (W). Relativamente ao quadrante Norte-noroeste (NNW) constata-se uma diminuição bastante significativa, em situação de temporal. De acordo com a análise realizada, os temporais provenientes de qualquer um dos quadrantes de Sudoeste praticamente não têm expressão nos registos observados em Leixões (Rosa-Santos, 2010).

Seguidamente apresentam-se as distribuições por classes de período médio (figura 4.24) e por alturas médias de onda (figura 4.25) para as situações de temporal persistente, registadas no marégrafo do Porto de Leixões durante o ano de 1995.

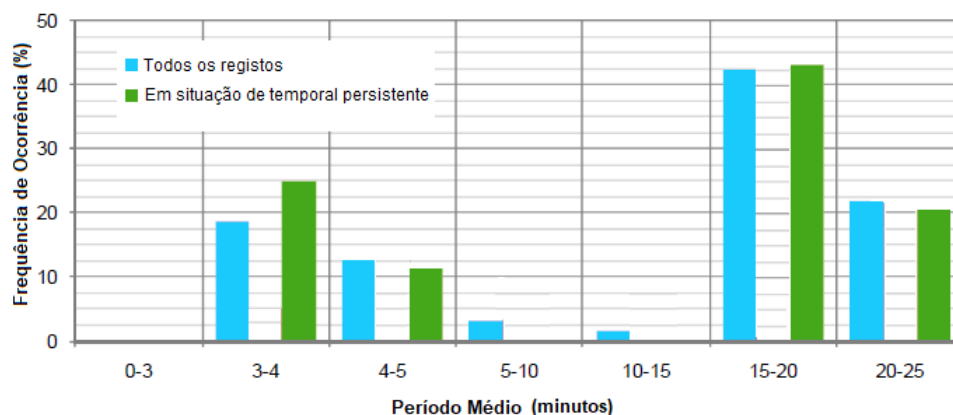


Figura 4.24 - Período médio das ondas de longo período registadas no marégrafo de Leixões em 1995. (adaptado de Rosa-Santos, 2010).

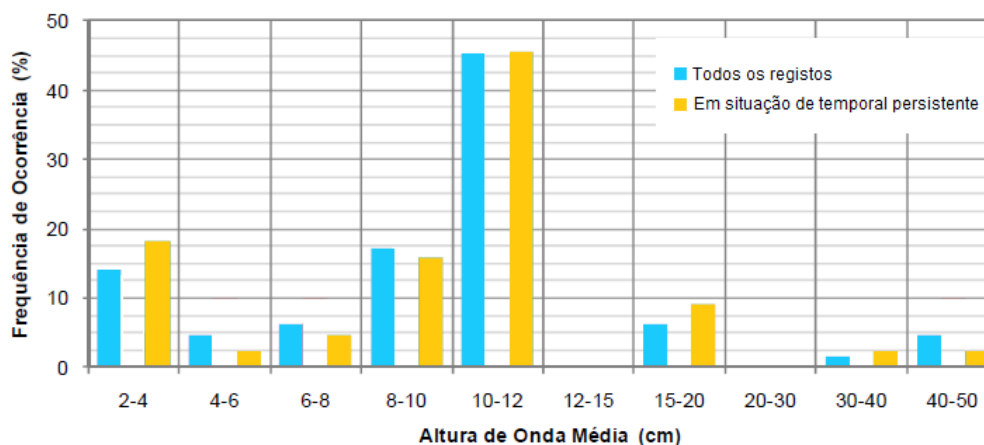


Figura 4.25 – Altura média das ondas de longo período registadas no marégrafo de Leixões em 1995. (adaptado de Rosa-Santos, 2010).

Considerando os dados referentes ao período médio, é possível constatar que, em situação de temporal persistente, o maior número de ocorrências corresponde a períodos entre os 15 e 20 minutos (cerca de 44% das ocorrências), havendo igualmente ocorrências significativas nos períodos entre 3 e 4 minutos (24% das ocorrências) e entre 20 e 25 minutos (20% das ocorrências).

Relativamente aos dados das alturas médias, Rosa-Santos (2010), realça ainda a existência de três temporais marítimos, ocorridos em 1973, 1974 e 1979, que evidenciaram a vulnerabilidade do quebra-mar norte do porto de Leixões. De facto, esse trecho da obra ficou por três vezes em estado de quase ruína, com os estragos a incidirem, especialmente, no talude em tetrápodes e na superestrutura em betão (Rosa-Santos, 2010). Os trabalhos de reparação dos estragos após os temporais de 1973 e 1974 consistiram, essencialmente, na reconstituição da obra, ou seja, na reposição das condições existente antes da ocorrência dos temporais, sendo que um número

significativo dos elementos removidos durante esses temporais, não pode ser reutilizado nas operações de reconstrução do quebra-mar, utilizando-se um total de 1010 novos tetrápodes nas obras de reparação.



Figura 4.26 – Zona interior do porto adjacente à extremidade sul do quebra-mar norte de Leixões (imagem à esquerda), e zona de afloramentos rochosos e de acumulação de materiais removidos da estrutura principal do quebra-mar durante os temporais (Rosa-Santos, 2010).

4.4. Aspetos sensíveis do porto

De acordo com o referido na secção anterior, as estruturas marítimas do porto de Leixões encontram-se sujeitas a fortes temporais, causando danos nas estruturas e dificuldades no decorrer das atividades portuárias aí desenvolvidas. Uma vez que o quebra-mar norte se apresenta como a primeira defesa física do porto de Leixões, será fundamental aferir quais as condições de agitação marítima possíveis de originar danos na estrutura, ou de interromper as atividades portuárias nos postos abrigados por este quebra-mar.

Como tal, e tendo em conta que a direção normal ao quebra-mar norte faz um ângulo de 256° (em relação ao norte e no sentido direto), prevê-se que as ondas com direção predominante do quadrante Oeste (270°) sejam as mais nefastas para esta estrutura, uma vez que têm uma incidência aproximadamente perpendicular à mesma (ver figura 4.27).



Figura 4.27 – Direção de agitação marítima mais desfavorável às estruturas marítimas de Leixões (Adaptado de Google Maps).

Um dos aspetos de maior sensibilidade no porto de Leixões trata-se do posto A, localizado na extremidade sul do quebra-mar norte, cuja ocorrência de situações de inoperacionalidade devido às condições de agitação marítima, têm vindo a preocupar a Autoridade Portuária, que tem procurado, nos últimos anos e através de diferentes formas, encontrar soluções que proporcionem uma melhoria da situação atual (Rosa-Santos, 2010).



Figura 4.28 – Posto de acostagem de petroleiros (Posto “A”), no quebra-mar norte do porto de Leixões (Teixeira, 2012).

Relativamente aos postos petroleiros do quebra-mar norte, o posto A é aquele que apresenta mais ocorrências de inoperacionalidade, quando comparado com os restantes, postos B e C, localizados no mesmo quebra-mar. Este facto poderá ser consequência da existência da proteção exterior do quebra-mar norte, e do distanciamento existente entre esta estrutura e os postos B e C, que diminui as consequências do galgamento nas atividades aí desenvolvidas. Por sua vez, o posto A, encontra-se localizado numa zona adjacente do quebra-mar norte, próximo da cabeça do mesmo, não existindo uma distância tão significativa para esta estrutura, como as existentes nos restantes postos, ocorrendo situações de galgamento neste trecho (ver figura 4.29).



Figura 4.29 -Exemplo de desgaste do manto resistente de tetrápodes, na extremidade sul do quebra-mar norte de Leixões, adjacente ao posto A (Arquivo APDL, 2009, em Castro, 2015).

Por este motivo, são muitas vezes registadas situações em que os petroleiros amarrados neste posto apresentam movimentos excessivos, com rutura de cabos de amarração, e as operações de carga e descarga do navio tornam-se mais difíceis ou até impossíveis de realizar em situação de segurança (Rosa-Santos, 2010). O fenómeno de galgamento pode influenciar as condições operacionais e de segurança do Posto “A”, especialmente se este ocorrer no trecho adjacente ao mesmo. No entanto, as condições de segurança podem ser afetadas pela difração da agitação marítima em torno da cabeça do quebra-mar norte, ou pela transmissão através da estrutura do mesmo.

A figura 4.30, apresenta uma análise dos registos de inoperacionalidade do posto A entre 1990 e 2003 (dados fornecidos pela Galp Energia), identificando que a percentagem média mensal de inoperacionalidade se situa em cerca de 23%, ocorrendo os picos de inoperacionalidade nos meses de janeiro e de dezembro (IHRH-FEUP, 2004 em Rosa-Santos, 2010).

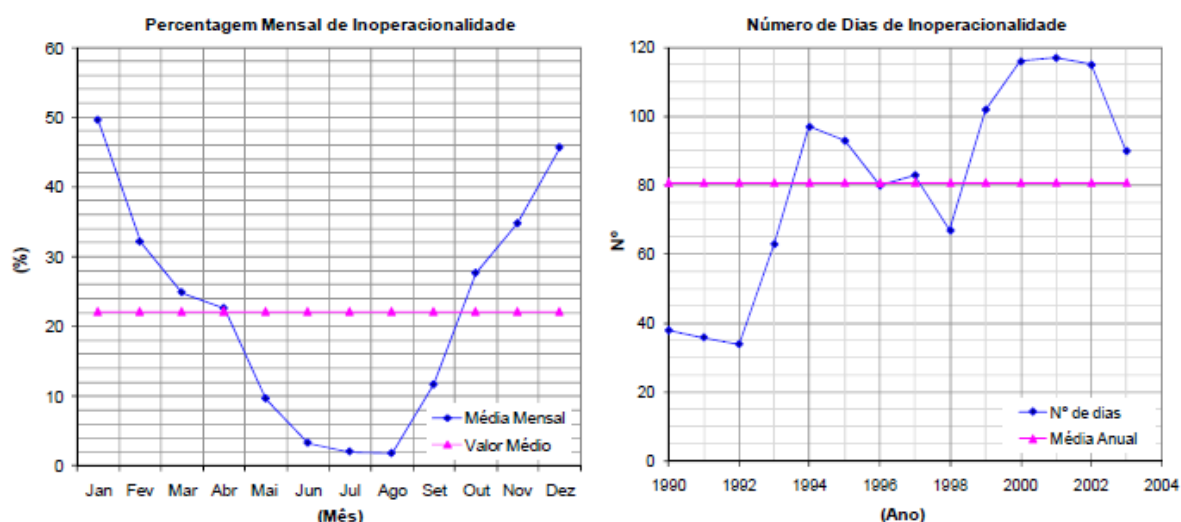


Figura 4.30 – Condições de operacionalidade do Posto A, do terminal de petroleiros do porto de Leixões (IHRH-FEUP, 2004, em Rosa-Santos, 2010)

Estes dados refletem ainda uma tendência de aumento de ocorrências de inoperacionalidade do posto A, durante o período analisado, estando em média inativo durante 80 dias, que representa aproximadamente 22% do ano. As condições de inoperacionalidade aqui representadas, refletem situações em que o Posto “A” não pôde ser utilizado devido a condições marítimas adversas, e também os dias em que foram realizadas operações de manutenção na estrutura de acostagem, ou dragagens para manutenção de fundos na bacia de aproximação.

Os episódios de galgamento do quebra-mar Norte de Leixões foram considerados pelos pilotos da Barra de Leixões e pelos responsáveis pela exploração do Posto “A” como preocupantes sob o ponto de vista, quer da operacionalidade, quer da segurança no terminal (Rosa-Santos, 2010), sendo

que o volume de galgamento pode afetar a tranquilidade portuária neste posto, interrompendo as operações em curso, sendo necessário o auxílio de rebocadores com o objetivo de reduzir a amplitude de oscilação do navio atracado. Caso os esforços para manter o navio amarrado no cais em segurança fracassem, este é obrigado a abandonar o cais com o auxílio dos rebocadores e a esperar, ao largo, por melhores condições para retomar as operações de movimentação de carga entretanto interrompidas.

Todavia, o número de situações críticas com navios amarrados no Posto “A” diminuiu após a instalação, em 2006, de um sistema monobóia (Terminal Oceânico) ao largo de Leixões (Rosa-Santos 2010).



Figura 4.31 - Terminal oceânico de Leixões (APDL, 2017).

Atualmente, os navios petroleiros de grande porte utilizam este sistema para as operações de descarga do petróleo bruto. No entanto, e sempre que necessário, o Posto A é utilizado em simultâneo com o sistema monobóia com o intuito de dar resposta a necessidades de ponta da refinaria de Leça da Palmeira (Rosa-Santos et al., 2008).

No que concerne ao molhe sul, será expetável que a agitação marítima neste local seja menos intensa que no quebra-mar Norte, uma vez que o ultimo representa a primeira defesa do porto de Leixões, estando o molhe Sul mais protegido. No entanto, e por nesta estrutura se localizar o Terminal de Cruzeiros, um porto de Recreio e o edifício Central, prevê-se uma afluência considerável de pessoas nesta plataforma do porto de Leixões, tratando-se de um local de sensibilidade e interesse aquando a avaliação dos riscos de galgamentos.

5. AGITAÇÃO E GALGAMENTO

5.1. Dados disponíveis

5.1.1. Introdução

Pretendendo o presente estudo avaliar o risco associado ao galgamento sobre as estruturas portuárias do porto de Leixões, torna-se fulcral conhecer as características da agitação marítima, desde o largo do porto até às estruturas marítimas do porto e avaliar o consequente galgamento.

Nesse sentido, haverá primeiramente que determinar as características da agitação marítima junto a cada uma das estruturas, que no presente estudo é efetuado recorrendo a modelos numéricos e depois avaliar o consequente galgamento, que neste estudo é efetuado recorrendo à ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

Assim, e tendo em consideração que a área a modelar apresenta variações significativas nos valores de batimetria do fundo, utilizaram-se vários modelos numéricos de propagação de agitação marítima, permitindo uma caracterização eficaz destas condições desde o largo do porto de Leixões, até ao interior do mesmo. Assim, foram utilizados três modelos para a concretização desta caracterização: primeiramente, o modelo WAM (Hasselmann et al., 1998) que fornece as estimativas da agitação marítima para cada 6 horas num ponto localizado ao largo do porto de Leixões; depois, o modelo SWAN (Booij et al., 1999), cujo objetivo é caraterizar a propagação dessas ondas desde o largo até à zona costeira, e finalmente, o modelo DREAMS (Fortes, 2002) capaz de caracterizar a propagação da agitação marítima até ao interior do porto, que tem em conta os efeitos da difração, refração e reflexão das ondas nas estruturas portuárias.

Finalmente, procedeu-se ao cálculo do caudal médio galgado nas estruturas de defesa do porto de Leixões, através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al., 2005), sendo os resultados obtidos por esta ferramenta, essenciais na elaboração do mapa de risco.

Os dados primários necessários à aplicação destes modelos são referentes ao período temporal de 1979 a 2016 (38 anos), sendo esta metodologia representada pela figura 5.1.

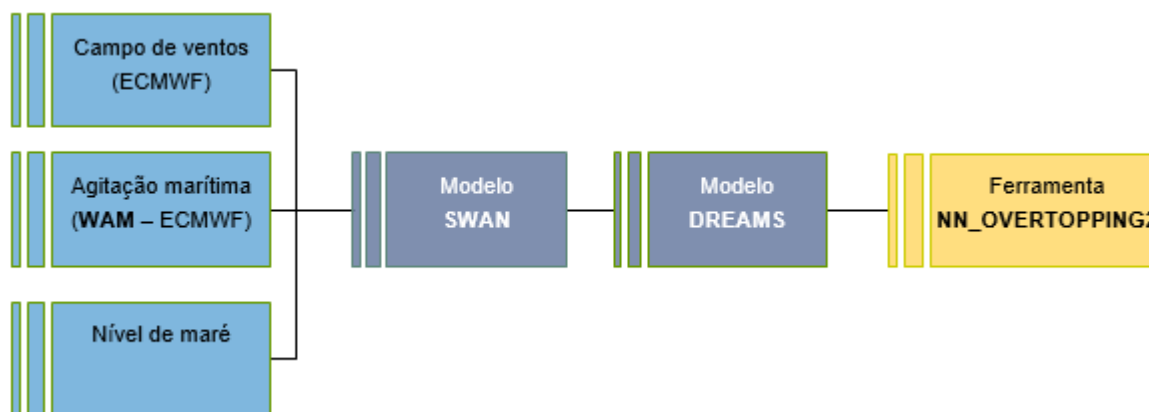


Figura 5.1 - Processo de caracterização da agitação marítima desde o largo à entrada do porto de Leixões.

5.1.2. Caraterização da agitação marítima ao largo do Porto de Leixões

Para a caraterização da agitação marítima ao largo do porto de Leixões, utilizaram-se os resultados disponibilizados pela ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecast*) que, por sua vez, utiliza o modelo WAM (Wave Modeling).

O modelo WAM (Hasselmann et al., 1998) é um modelo de ondas de terceira geração que resolve a evolução do espectro bidimensional de ondas superficiais através da integração da equação do transporte de energia, podendo ser usado à escala regional ou global, para águas profundas ou pouco profundas.

Foram utilizados os resultados obtidos por esta ferramenta, referente aos dados de altura significativa de onda (H_s), direção de onda (DIR) e o período de pico de onda (T_p), para o ponto W localizado ao largo de Leixões, com coordenadas 41°10'00" N, 8°59'00" W (figura 5.2). Através destes dados, estimaram-se os valores de agitação marítima de 6 em 6 horas ao longo de um período de 38 anos consecutivos, desde janeiro de 1979 até agosto de 2016.



Figura 5.2 - Localização do ponto de cálculo do modelo de reconstituição WAM (ponto W), comparativamente ao porto de Leixões, representado pelo retângulo a vermelho (adaptado de Google Earth).

Os resultados são representados através de um ficheiro .txt, contendo colunas representativas dos parâmetros H_s , T_p e DIR , assim como a respetiva data de estimativa dos mesmos, perfazendo um total de 55 032 contagens. Segue-se a análise estatística dos resultados fornecidos pelo ECMWF (tabela 5.1), assim como as séries temporais dos mesmos (figura 5.3, figura 5.4 e figura 5.5), sendo o conjunto destes parâmetros os dados necessários ao modelo SWAN. Note-se que o modelo WAM não descreve convenientemente os fenómenos em zonas de águas de profundidade intermédia a pouco profunda como é o caso do modelo SWAN.

Tabela 5.1 – Análise estatística referente ao ponto ao largo do porto de Leixões, obtidos com o modelo WAM.

Parâmetros	H_s [m]	T_p [m]	DIR [°]
Média	2,046	9,053	291,036
Mediana	1,820	8,900	304,000
Moda	1,490	8,100	300,000
Desvio-padrão	0,961	1,971	65,554
Mínimo	0,400	4,400	0,000
Máximo	9,820	16,700	360,000
Contagem	55032	55032	55032

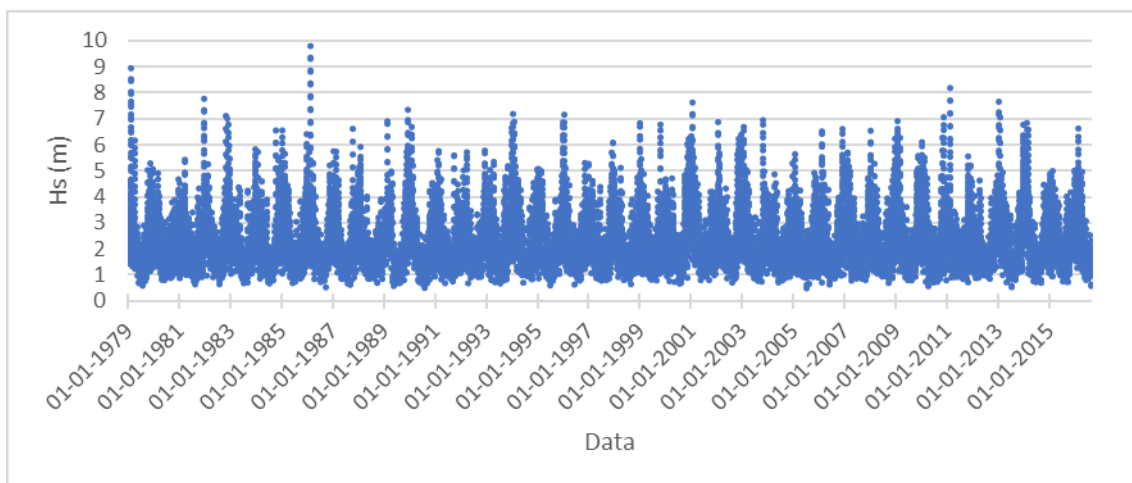


Figura 5.3 - Altura de onda significativa (H_s) calculada pelo WAM, para o período de 1979 a 2016.

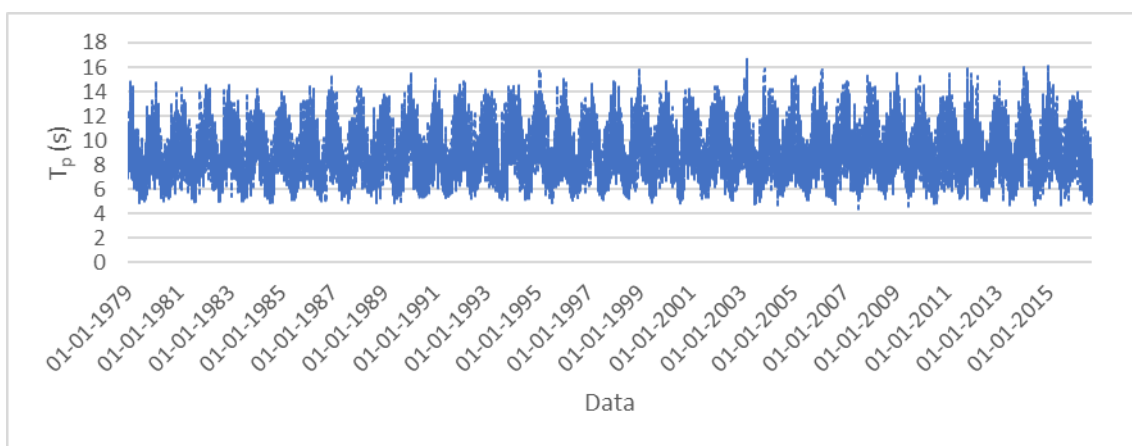


Figura 5.4 – Período de pico (T_p) calculado pelo WAM, para o período de 1979 a 2016.

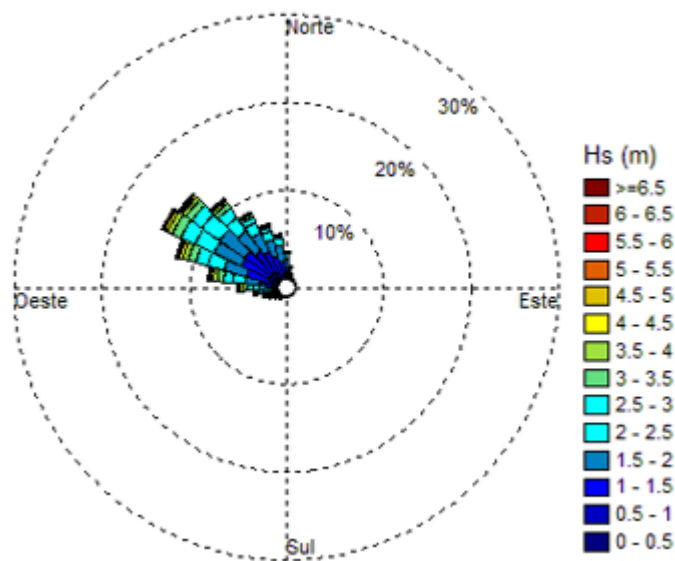


Figura 5.5 - Direção de onda (DIR) calculada pelo WAM, para o período de 1979 a 2016.

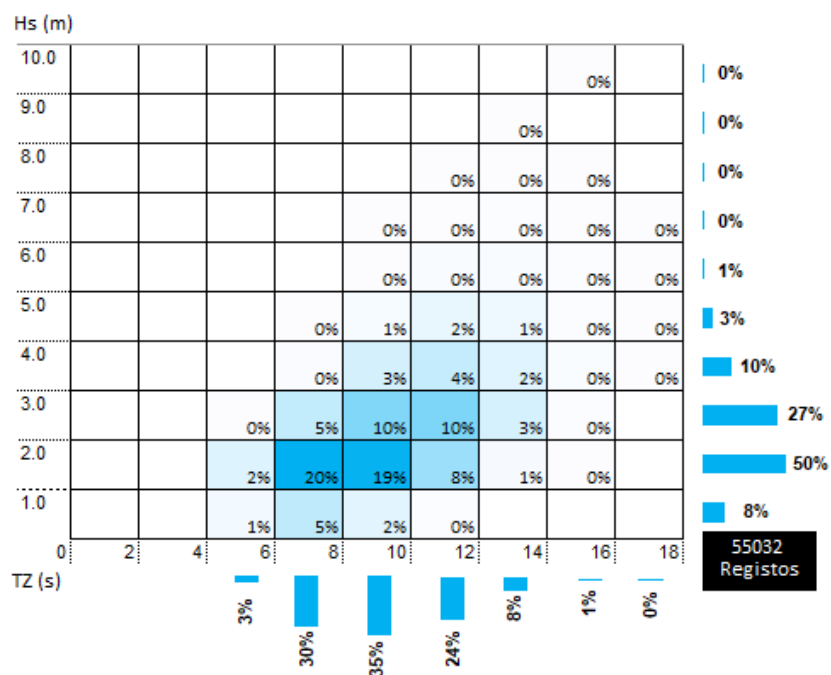


Figura 5.6 - Ocorrência em percentagem dos parâmetros Hs e Tp. Dados do ECMWF no ponto W.

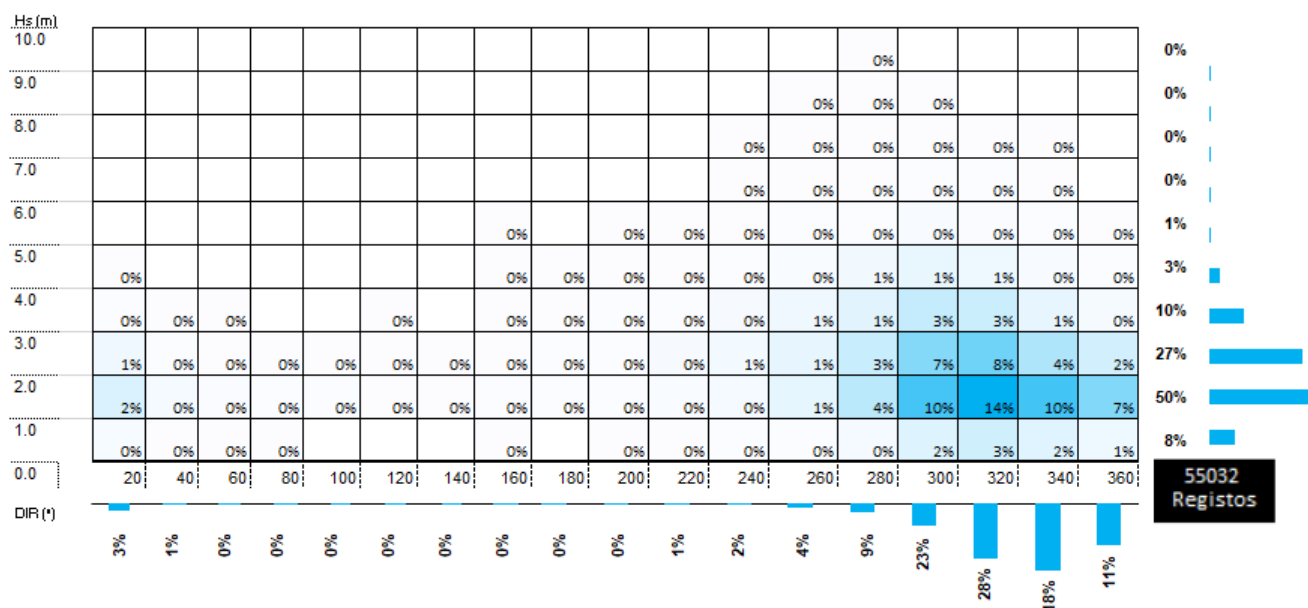


Figura 5.7 - Ocorrência em percentagem dos parâmetros H_s e DIR. Dados do ECMWF no ponto W.

Analisando o período de 38 anos, constatou-se que:

- Relativamente ao parâmetro de altura de onda significativa, H_s , este varia entre 0,4 e 9,82 metros, sendo 2,05 o valor médio. A maioria dos valores observados (cerca de 95%) encontra-se entre gamas de 0 a 4 metros;
- O período de pico de onda, T_p , revela gamas entre 4,4 e 16,7 segundos, sendo 9,1 o valor médio. A maioria dos valores (cerca de 97%) encontra-se entre 6 s e 13 s;
- A direção média de onda, DIR, apresenta gamas entre os 0° os 360°, constatando-se que apenas 5% dos valores estão compreendidos entre os 0° e os 180°, e que 85% dos valores são superiores a 270°, evidenciando uma predominância de ondas advindas do quadrante noroeste.

5.1.3. Nível de maré

Uma vez que a agitação marítima é influenciada pelo nível de maré (NM), é essencial perceber a variação da mesma ao longo do período de análise, de modo a aumentar a fiabilidade das previsões. O nível médio da água do mar varia consoante a maré astronómica, sendo mais elevado em preia-mar. Neste caso, existe menor área de talude emersa para dissipação de energia da agitação, causando maior probabilidade de ocorrência de galgamento (Rodrigues, 2014).

O nível de maré é influenciado pela maré astronómica, que pode ser estimada com base em análises harmónicas de séries de observações maregráficas de duração variável podendo ser obtidas através do *software* XTide (Flatter, 1998). O nível médio da água do mar varia ainda com as condições meteorológicas, como é o caso da sobrelevação meteorológica (ou *storm surge*), que consiste numa subida temporária do nível do mar devido à variação no campo de pressões atmosféricas, ou à ação de ventos fortes e prolongados (Dias e Taborda, 1992).

O nível médio do mar pode ser obtido através de duas formas, nomeadamente recorrendo a leituras de marégrafos (instrumentos que possibilitam a medição da variação do nível das águas de determinado local), que incluem a sobrelevação meteorológica, ou através da previsão da maré astronómica à qual se adiciona a previsão de sobrelevação meteorológica (Rodrigues, 2014).

É importante referir que todos os níveis de maré se encontram de acordo com um zero hidrográfico (ZH), definido em função de cada local. O zero hidrográfico é um plano de referência convencionado, situado abaixo do nível de maré astronómica mais baixa, ao qual estão referidas as sondas e as linhas de batimétricas representadas nas cartas náuticas, tendo por objectivo a segurança na navegabilidade marítima (Instituto Hidrográfico). Em Portugal continental, nomeadamente no Porto de Leixões, o zero hidrográfico está estabelecido a 2,00 m abaixo do nível médio do mar adotado (NMA).

Posto isto, os valores referentes ao nível de maré utilizados na presente dissertação, foram calculados por estimativa de uma onda harmónica e fornecidos pelo ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast), correspondendo ao período de janeiro de 1979 a agosto de 2016. Aos referidos valores de nível de maré, foi adicionado um incremento de 0,4 metros, de modo a se considerar os efeitos de sobrelevação meteorológica. A figura 5.8 representa a variação do nível de maré durante o período em estudo, observando-se variação entre 0,52 e 3,58 metros, relativamente ao zero hidrográfico.

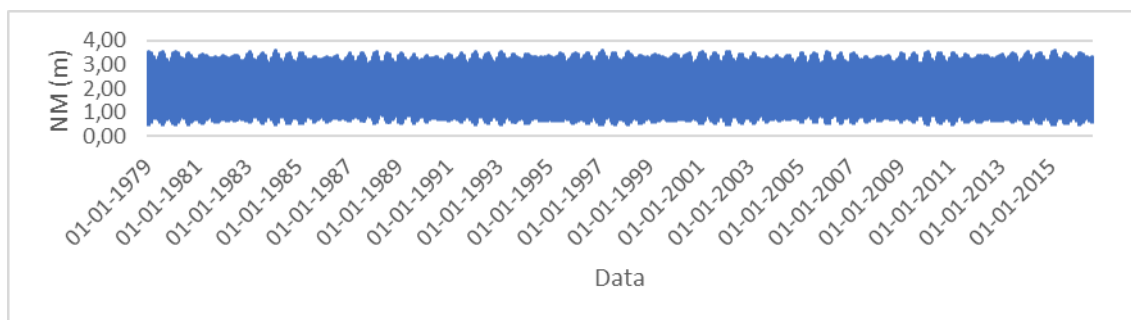


Figura 5.8 - Variação do nível de maré durante os 38 anos avaliados (de 1979 a 2016)

5.2. Caracterização da agitação marítima junto à costa

5.2.1. Introdução

O modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore) é um modelo numérico para a geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação para a conservação da ação da onda (Booij et al., 1999) destinando-se à caracterização da agitação marítima em zonas costeiras (até à zona de rebentação) tendo em conta a existência de correntes e a geração de ondas de vento. O modelo foi desenvolvido na Universidade Técnica de Delft, Holanda, considerando-se a versão para águas intermédias a pouco profundas do modelo WAM, sendo que todos os processos de geração, dissipação e interações não lineares entre ondas, são representados de forma explícita, sem serem necessárias quaisquer hipóteses iniciais sobre a forma de espectro (do Carmo, 2016).

Considera-se o modelo SWAN como uma extensão dos modelos de terceira geração para previsões de agitação marítima em águas pouco profundas, sendo adequado para grandes áreas costeiras contabilizando processos físicos de refração e difração devido a variações no fundo e presença de correntes, crescimento de onda por ação do vento, rebentação por influência do fundo e do declive acentuado, dissipação de energia devido ao atrito, bloqueio e reflexão por correntes opostas e transmissão através de obstáculos (Lourenço, 2016).

Os dados necessários para a execução do SWAN são a malha batimétrica da zona a modelar, as condições de agitação na fronteira de entrada do domínio de cálculo ou, alternativamente, o campo de ventos para o forçamento da geração de ondas e os fenómenos físicos a ter em conta (Lourenço, 2016).

Os resultados obtidos através da utilização desta ferramenta são fulcrais para a previsão e caracterização da agitação marítima, desde a zona de geração de onda até à zona costeira, local de interesse para o presente estudo. O modelo SWAN apresenta como resultados, em qualquer ponto do domínio, a altura significativa da onda (H_s), os períodos médios (T_z) e de pico (T_p), a direção média (θ_m) e de pico (θ), o comprimento de onda (λ), e a dispersão direcional. Como qualquer modelo, este possui limitações na correta representação de um estado de agitação, que são devidas, quer à formulação teórica em que o modelo se baseia, quer ao esquema numérico utilizado. Relativamente à formulação teórica, a principal limitação está relacionada com a calibração dos parâmetros envolvidos na descrição dos diferentes fenómenos físicos (Neves, 2009).

5.2.2. Condições de aplicação do modelo SWAN

Para a execução do modelo SWAN, procedeu-se à introdução de dados base, que representam informações necessárias sobre a área de estudo. Estes dados são referentes a características batimétricas na envoltória do porto de Leixões, ao regime de agitação ao largo do mesmo, e às condições de ventos e marés.

A batimetria do domínio em estudo é representada por uma malha batimétrica utilizada nos dados do modelo SWAN. Esta batimetria foi utilizada em estudos desenvolvidos pelo LNEC, e que resulta da interligação com recurso ao software Surfer™, de dados batimétricos de uma batimetria de acesso público (EMODNET) e de pontos de um levantamento hidrográfico (realizado em março de 2007 pela GEOMYTSA), fornecido pela APDL.

Uma vez que a área a modelar é relativamente pequena, optou-se por se desprezar a ação do vento, condição que se torna mais relevante em domínios de cálculo de maiores dimensões. Relativamente ao domínio computacional utilizado, optou-se pela aplicação de duas malhas computacionais de diferentes dimensões, sendo a *main grid* a malha maior, e a *nested grid* a mais pequena. As características batimétricas do local de estudo, assim como as duas malhas utilizadas no modelo SWAN, estão representadas pela figura 5.9.

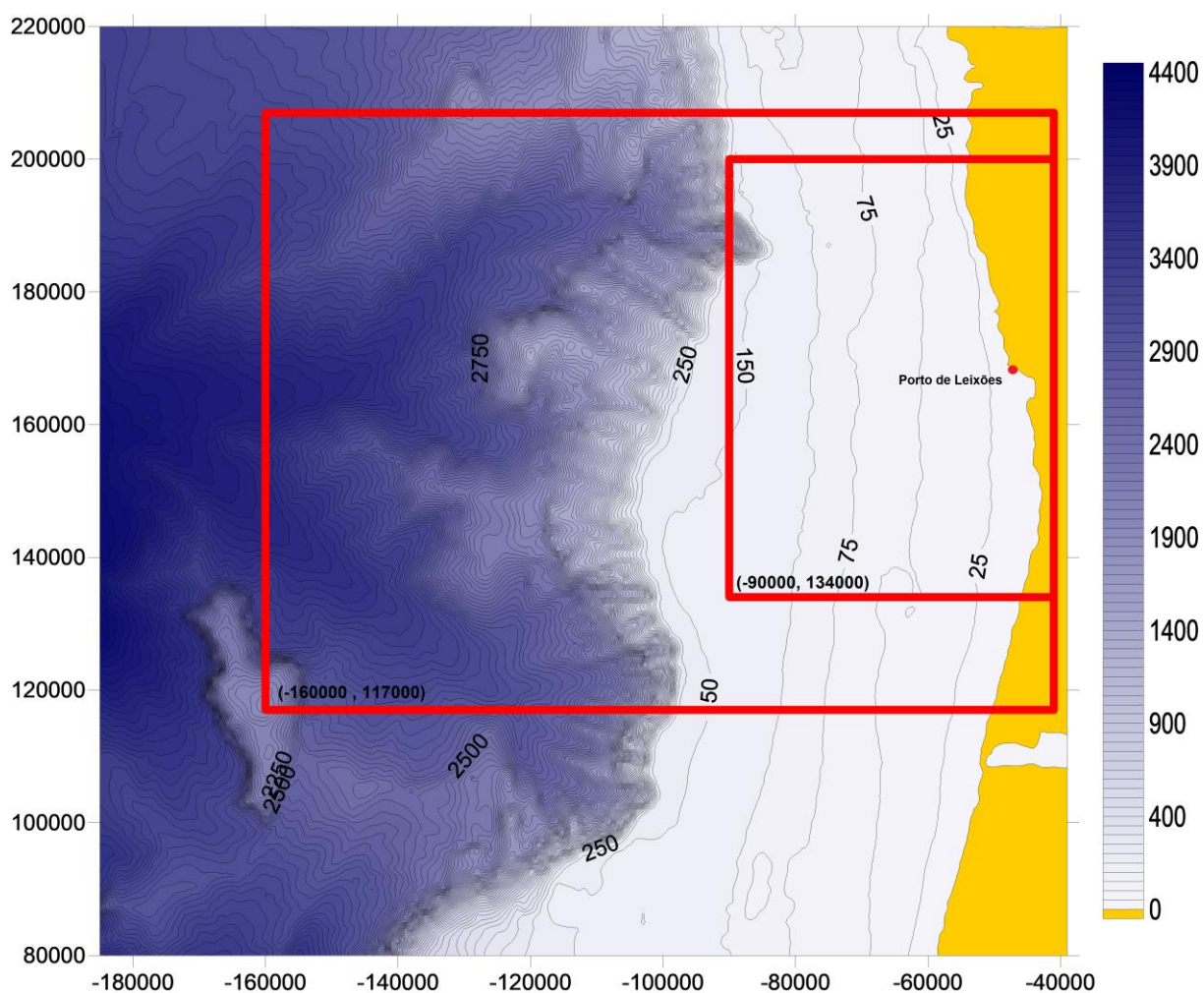


Figura 5.9 - Batimetria e malhas utilizadas na aplicação do modelo SWAN.

A malha maior engloba toda a área marítima em frente ao porto de Leixões, com dimensões de 119 km por 90 km. A malha mais pequena, *nested grid*, engloba a zona do porto de Leixões, com

dimensões de 49 km por 66 km, sendo as condições de fronteira desta malha constituídas pelos resultados da *main grid*.

Obtiveram-se os resultados do modelo SWAN para o período de Janeiro de 1979 a Agosto de 2016 para um total de 23 pontos. Apenas os dados relativos ao ponto P14 (ver figura 5.10) foram analisados, uma vez que se trata do ponto mais próximo da entrada do porto de Leixões, sendo por isso mais representativo da agitação que irá entrar no porto. O ponto P14 (de coordenadas 41°09'54.3"N 8°42'31.7"O) será o ponto utilizado para transferir as condições de agitação marítima para o modelo DREAMS.

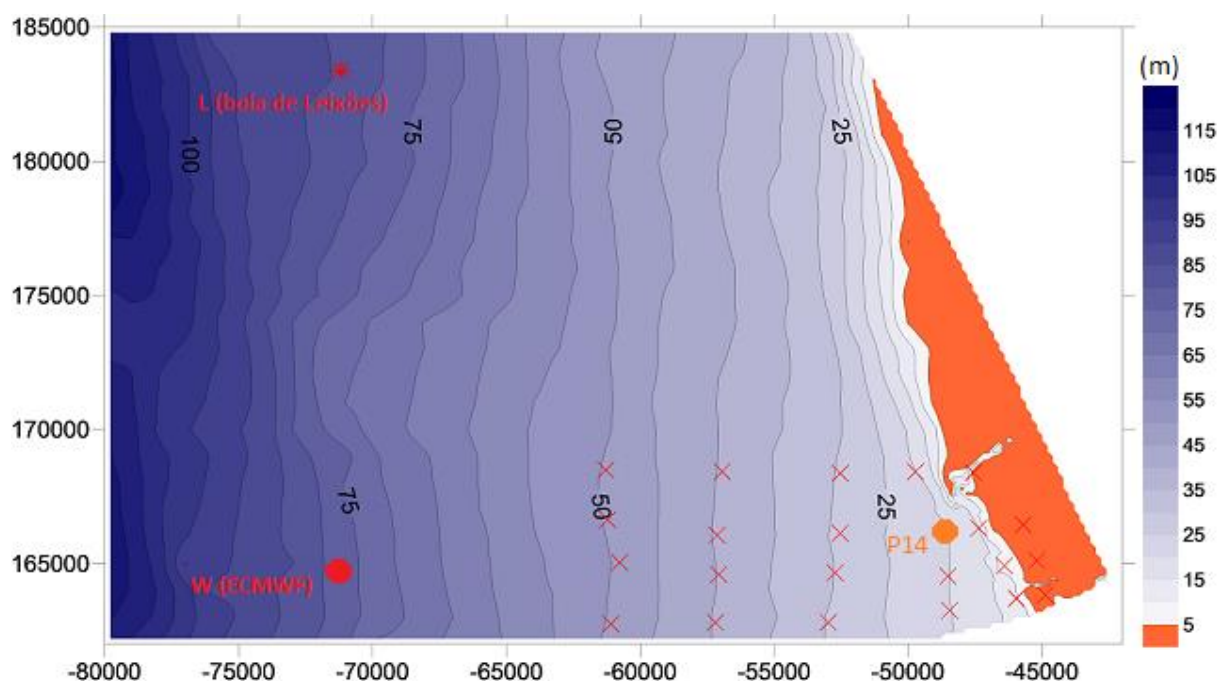


Figura 5.10 – Representação dos pontos de cálculo do modelo SWAN e indicação dos pontos P14, W(ECMWF) e L (boia ondógrafo de Leixões).

Tabela 5.2 - Coordenadas dos pontos de cálculo do estudo.

Ponto	Latitude (°)	Longitude(°)	X (m)	Y (m)	Batimétrica (ZHL) (m)
	WGS84	WGS84	ETRS89 Datum73	ETRS89 Datum73	
W	41° 10' 00" N	8° 59' 00" O	-71354	166736	-81
P14	41° 10' 06.6" N	8° 42' 38.4" O	-48640	166195	-21

5.2.3. Análise de resultados

De seguida, apresenta-se uma tabela representativa da análise estatística resultante dos dados obtidos através do modelo SWAN, para o ponto de estudo P14, onde se identificam os parâmetros de altura significativa, período médio, período de pico e direção média e de pico, para o período dos 38 anos em estudo (tabela 5.3).

Tabela 5.3 - Análise estatística dos resultados obtidos com o modelo SWAN para o ponto P14.

	H_s [m]	T_m [s]	T_p [s]	θ [°]	θ_p [°]
Média	1,638	7,580	9,012	299,169	300,729
Mediana	1,460	7,427	9,103	300,611	307,500
Moda	1,039	6,376	9,103	273,853	307,500
Desvio-padrão	0,917	1,620	1,995	25,895	27,720
Mínimo	0,001	4,063	4,488	188,506	187,500
Máximo	8,420	13,597	16,689	339,223	337,500
Contagem	55032	55032	55032	55032	55032

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos pelo modelo SWAN, apresenta-se de seguida a rosa das direções, DIR (figura 5.11), assim como a comparação entre os registos de direção de onda dos modelos WAM e SWAN (tabela 5.4). Apresentam-se também os histogramas conjuntos e marginais de HS-TZ (figura 5.12) e HS-DIR (figura 5.13), correspondentes ao período total de dados, de 1 de janeiro de 1979 e 31 de agosto de 2016.

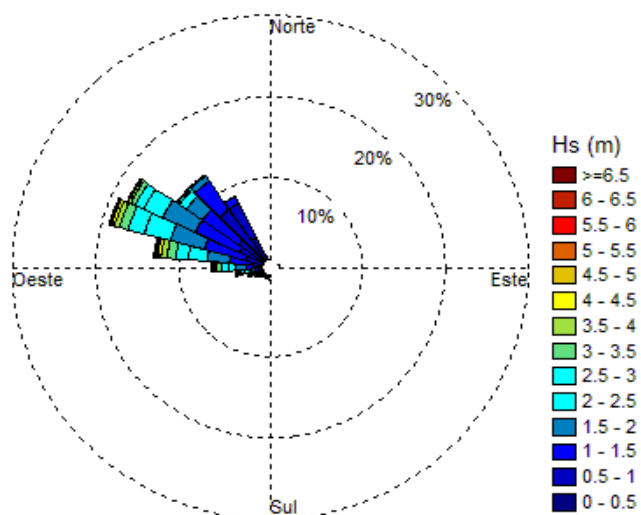


Figura 5.11 - Representação das direções de onda no ponto P14 da ferramenta SWAN

Tabela 5.4 - Comparação entre a direção de onda registada nos modelos WAM e SWAN.

[°]	Modelo WAM		Modelo SWAN	
	Nº de ocorrências	%	Nº de ocorrências	%
entre 0 e 90	2211	4,0	0	0,0
entre 90 e 180	295	0,5	0	0,0
entre 180 e 270	5775	10,5	5821	10,6
entre 270 e 360	46653	84,8	49211	89,4
Σ	54934	100	55032	100

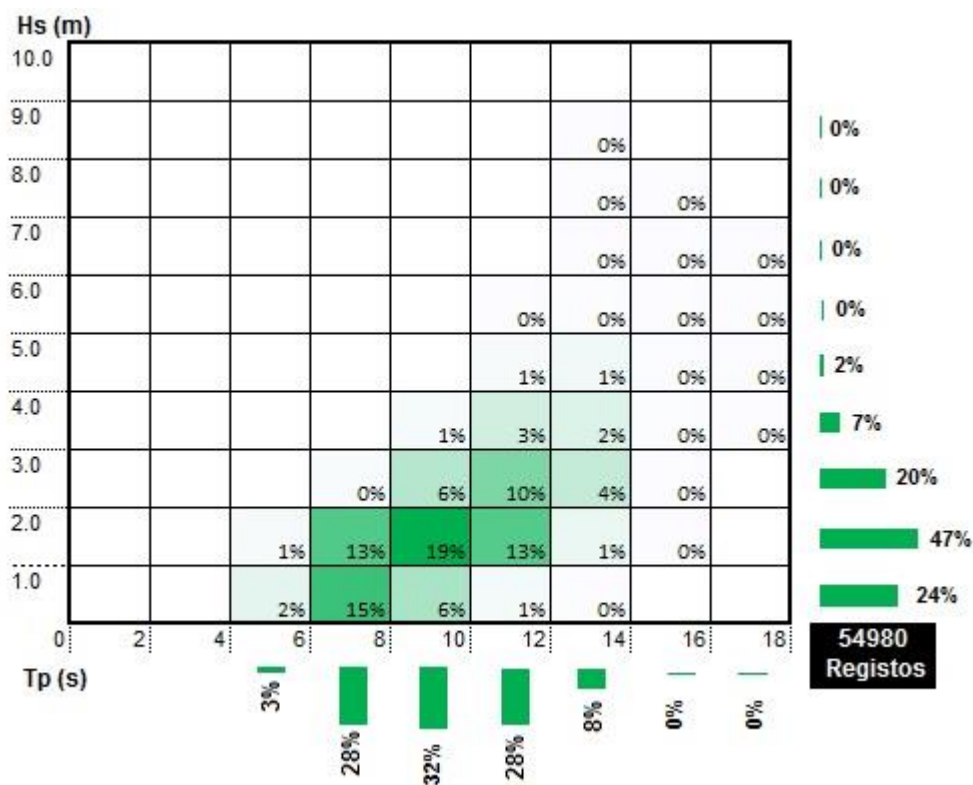


Figura 5.12 - Ocorrência em percentagem dos parâmetros Hs e Tp. Dados do SWAN no ponto P14.

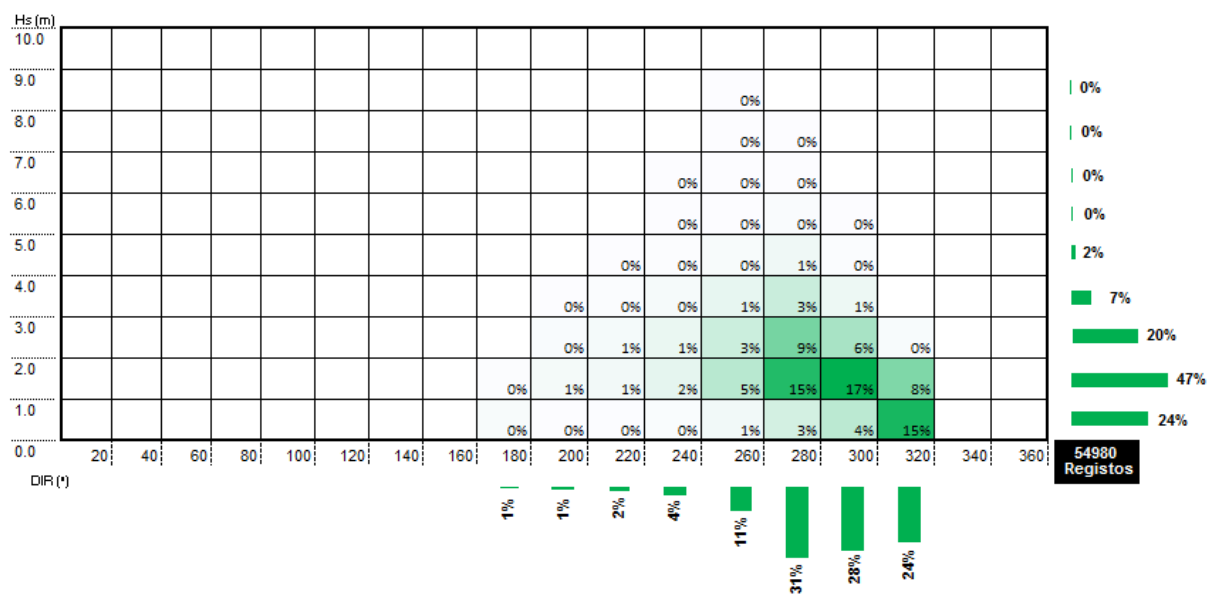


Figura 5.13 - Ocorrência em percentagem dos parâmetros Hs e DIR. Dados do SWAN no ponto P14.

Da análise das figuras anteriores, verifica-se que:

- As alturas significativas de onda, (H_s), estão entre os valores 0 m e 8,4 m, sendo a média de 1.6 m. A maioria dos valores (>95%) encontra-se entre as gamas de 0,0 a 4,0 m, sendo a gama mais frequente entre 1.0 e 2.0 m;
- A altura de onda significativa (H_s) calculada pelo modelo SWAN diminui consideravelmente comparativamente com o H_s fornecido pelo modelo WAM, indiciando que o efeito de refração provoca a diminuição do H_s desde o largo até à entrada no porto;
- O maior valor de altura significativa à entrada do porto de Leixões foi de 8,4 metros em fevereiro de 1986;
- Os períodos médios de onda, T_m , apresentam valores entre 4,1 s e 13,6 s, com média igual a 7,6 s. A maioria dos valores (cerca de 90%) encontra-se nas gamas entre 6 s e 12 s, sendo as gamas com maior frequência entre 6 s e 12 s;
- Relativamente ao período de onda, não se verificam variações significativas entre os modelos WAM e SWAN;
- As direções médias de onda, DIR, estão dentro da gama 189° a 339° , sendo o valor médio de 299° . A maioria dos valores de direções (cerca de 90%) verifica-se nas gamas entre 260° e 320° e as gamas mais frequentes estão entre 260° e 320° ;
- Não se observam ondas provenientes dos quadrantes nordeste e sudeste à entrada do porto (modelo SWAN), sendo que 89,42% das mesmas são provenientes do quadrante noroeste.

Os resultados analisados do modelo SWAN constituem os dados de entrada do modelo DREAMS, descrito no subcapítulo seguinte.

5.3. Caraterização da agitação marítima no interior do porto

5.3.1. Introdução

A aplicação do modelo DREAMS tem por objetivo a propagação das caraterísticas da agitação desde os pontos do SWAN (localizados na zona de entrada do porto de Leixões) até à zona interior do porto.

A resolução de complexidade e diversidade dos fenómenos relacionados com a deformação de ondas desde águas profundas até águas pouco profundas, obrigaria à resolução das equações de Navier-Stokes para a conservação da massa e da quantidade de movimento de um escoamento incompressível e viscoso, só sendo possível para regiões muito limitadas (Fortes, 2002). A solução

passa então por admitir certas hipóteses simplificativas, de modo a que a aproximação permita obter a solução de um dado problema com uma determinada precisão. Um exemplo deste tipo de aproximações é a equação de declive suave, que descreve os efeitos combinados da refração e difração e reflexão de ondas monocromáticas propagando-se em fundos de inclinação suave, tratando-se de uma equação indicada para a propagação e deformação de ondas em zonas abrigadas, como é o caso dos portos (Neves, 2009).

O modelo DREAMS, Fortes (2002) tem como base a equação elíptica suave, que descreve os efeitos combinados dos fenómenos de refração (modificação da velocidade e direção da onda) e difração (redistribuição da energia ao longo das cristas) de ondas, aquando a sua propagação em fundos de inclinação suave (portos, marinas, baías e zonas costeiras), recorrendo-se ao Método de Elementos Finitos (MEF) para resolver a equação de declive suave (Fortes, 2002).

As condições de fronteira implementadas no DREAMS são: condição de radiação que permite a saída das ondas geradas no domínio; condição de geração e radiação combinadas que simula a entrada e saída de ondas numa fronteira do domínio (por exemplo, nas fronteiras abertas); condição de reflexão (total ou parcial) que simula fronteiras como praias, falésias, molhes ou obras acostáveis. Os dados a fornecer no modelo DREAMS são as características da agitação marítima incidente (período e direção da onda), o nível de maré, os coeficientes de reflexão em cada troço da fronteira do domínio de cálculo, a batimetria e as características da malha de elementos finitos com que foi discretizado o domínio em estudo (Fortes, 2002).

Os resultados obtidos através do modelo DREAMS são os índices de agitação H/H_0 , (relação entre a altura de onda no ponto do domínio de cálculo, H , e a altura de onda à entrada do domínio de cálculo, H_0), direções de propagação da onda, o campo de velocidades horizontais na superfície livre e as linhas representativas das cristas das ondas (linhas de igual fase) (Fortes, 2002).

Tal como a maioria dos modelos numéricos, este apresenta limitações salientando-se (i) o fato do modelo não ter em conta os efeitos da dissipação de energia por rebentação e atrito de fundo, os efeitos das correntes na propagação das ondas ou os galgamentos sobre estruturas portuárias; (ii) O modelo é linear pelo que não tem em conta efeitos não-lineares, como por exemplo, a interação de ondas e correntes, a interação de ondas devido à topografia do fundo, a transferência de energia entre componentes de onda e a geração de componentes de baixa frequência induzidas por grupos de ondas curtas; (iii) O modelo efetua a propagação de ondas regulares e unidirecionais, não tendo por isso em conta, os efeitos da dispersão em frequência e em direção, presentes na agitação real; (iv) A aplicação do modelo está condicionada a fundos de declive suave, ou seja, até $1/3$; (v) Na propagação de ondas marítimas de curto período, a aplicação do modelo está limitada a zonas relativamente pequenas, devido ao elevado esforço computacional exigido pelo modelo (Neves, 2009).

A metodologia seguida para aplicação do modelo DREAMS passa por:

- a) definir o domínio de cálculo do caso em estudo;
- b) gerar uma malha irregular de elementos finitos de acordo com a batimetria do local de estudo;
- c) construir os ficheiros de dados de entrada no modelo, como é o caso das condições de agitação incidente que vão ser impostas e os coeficientes de reflexão a impor nos vários trechos que compõem a fronteira do modelo;
- d) executar o modelo e analisar os resultados.

Nas seções seguintes, descreve-se e apresenta-se as condições de aplicação do modelo DREAMS (batimetria e domínio de cálculo, condições de agitação incidente e de fronteira) É ainda efetuada uma análise comparativa dos resultados obtidos para os diferentes locais estudados, apresentando-se os regimes de agitação nos diferentes pontos e comentando os resultados obtidos.

5.3.2. Condições de aplicação do modelo DREAMS

- Batimetria

A batimetria utilizada no presente estudo teve origem em duas fontes. Através da "IberianCoast+DigitizeCoastline-ETRS89.xyz" que contém os pontos batimétricos, distanciados de 0.25', de uma batimetria de acesso público – EMODNET, e através de pontos do levantamento hidrográfico de março de 2007, que inclui sondagens entre -18 e -8 m (ZHL), fornecida pela APDL (levantamento efetuado pela GEOMYTSA). As duas batimetrias foram integradas e, através do software Surfer™, foi gerada uma nova grelha batimétrica regular, com resolução de 10 metros (ver figura 5.14)

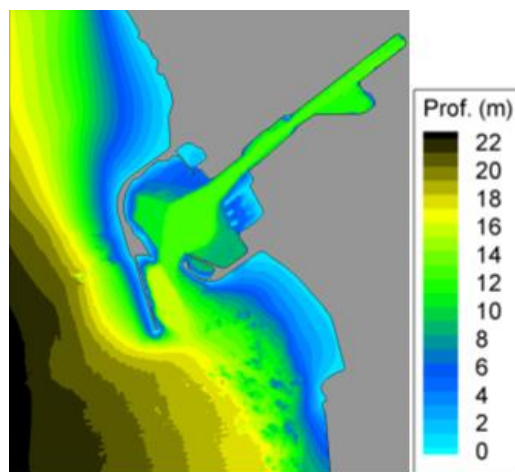


Figura 5.14 -Grelha batimétrica e linha de costa, utilizada no modelo DREAMS.

- Domínio de cálculo e condições de agitação

A propagação das características de agitação marítima através do modelo DREAMS, para os trinta e oito anos de estudo (janeiro de 1979 a agosto de 2016) envolveria um grande esforço computacional. O tempo de cálculo associado a cada simulação do modelo DREAMS é de cerca de 45 minutos o que para os 55032 registos, corresponderia a vários meses para efetuar a totalidade dos cálculos, sendo este método inviável para o presente estudo. Optou-se por utilizar a metodologia de matrizes de transferência Rosa-Santos, 2008, definindo a priori gamas de valores para o período de onda (T_p), direção de onda DIR (θ_m) e nível de maré (NM) representativas de todas as condições de agitação, mínimas e máximas, que se verificaram a partir do modelo SWAN. Assim, foi possível definir as características das ondas regulares incidentes, tendo por base as condições de agitação no ponto P14, definidas através do modelo SWAN. As características consideradas estão presentes na tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Gamas admitidos no modelo DREAMS

Variável	Gama do DREAMS	Passo de cálculo
T (T_p) (s)	4 a 18	2
DIR (θ_m) (°)	180 a 360	30
NM (m Z.H.)	0,0 a 4,0	0,5

Para estudar o regime de agitação marítima no interior do porto de Leixões, o domínio de cálculo foi discretizado por malhas de elementos finitos. O espaçamento em x e em y variou ao longo do domínio, tendo em conta a profundidade local, de forma a garantir uma média de 20 pontos por comprimento de onda, considerando uma onda incidente com período de 8 s. Em relação às características de fronteira do domínio de cálculo, estas correspondem às fronteiras marítimas (impostas pelo modelo SWAN) e às fronteiras terrestres, que delimitam os trechos de fronteiras físicas, correspondente às estruturas marítimas do porto de Leixões. Na figura 5.15 apresentam-se os diversos troços em que se divide a linha de costa do domínio computacional. Considerou-se os trechos GR1 a GR3 fronteiras marítimas, com condições de geração de onda e coeficiente “1”, e os trechos de A a C, como fronteiras terrestres, com refração condicional de coeficiente “0,5”.

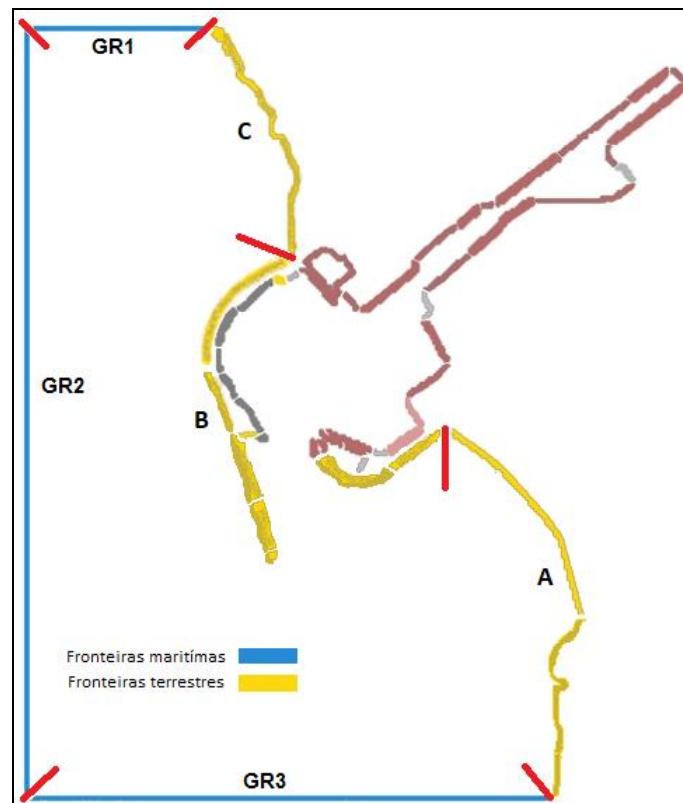


Figura 5.15 - Domínio de cálculo do modelo DREAMS.

Uma vez conhecidas as características das ondas regulares incidentes, bem como as características dos vários troços que compõem o domínio de estudo, procede-se à propagação com o modelo DREAMS, que culminará em resultados numéricos (índices de agitação e direção) em diferentes pontos selecionados em frente às estruturas marítimas do porto de Leixões.

Finalmente, com base nestes resultados numéricos, estabeleceram-se as matrizes de transferência em cada ponto, que relacionam as condições de agitação marítima no exterior do porto com as características no interior do mesmo.

5.3.3. Análise de resultados

Com as condições de aplicação descritas na secção anterior, efetuaram-se os cálculos sistemáticos de ondas regulares com o modelo DREAMS, que culminam em valores de índice de agitação e direção de onda em todo o domínio de cálculo.

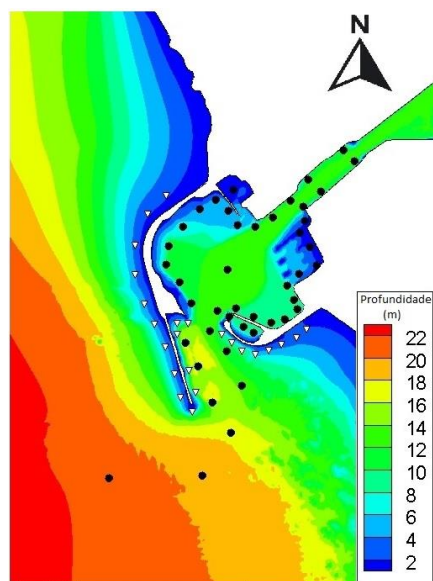


Figura 5.16 - Identificação dos 44 pontos corridos na ferramenta DREAMS (representados a preto e a branco) e valores de batimetria do porto de Leixões

No total, foram obtidos os resultados referentes a 44 pontos através da ferramenta DREAMS (figura 5.16), contudo, apenas se consideraram os 15 pontos com maior importância para os objetivos do presente estudo. Estes pontos (D1 a D15) foram posicionados estrategicamente em frente às estruturas marítimas do porto de Leixões (figura 5.17 e tabela 5.6), para a análise tendo em consideração o eventual risco de galgamento das mesmas e, consequentemente, riscos associados à gestão portuária.

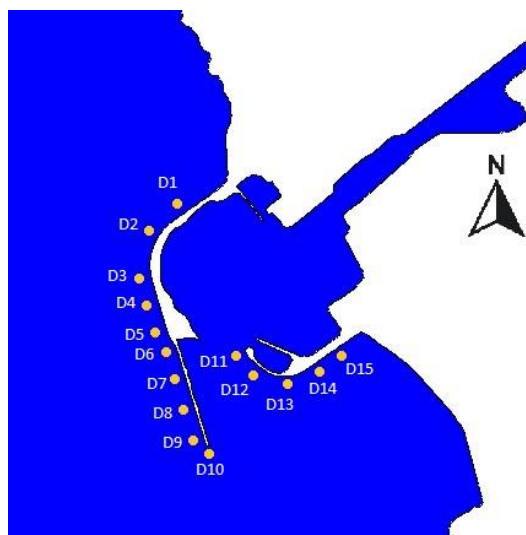


Figura 5.17 – Representação dos 15 pontos em estudo no modelo DREAMS e utilizados, posteriormente, na ferramenta NN_OVERTOPPING (D1 a D15)

Tabela 5.6 - Pontos utilizados no modelo DREAMS

Pontos do DREAMS	Designação	Estrutura pertencente	Localização geográfica	
			Latitude	Longitude
1	D1	Quebra-mar norte	41°11'8,28"N	8°42'36,33"W
2	D2	Quebra-mar norte	41°11'1,27"N	8°42'44,81"W
3	D3	Quebra-mar norte	41°10'52,37"N	8°42'44,88"W
4	D4	Quebra-mar norte	41°10'49,23"N	8°42'42,92"W
5	D5	Quebra-mar norte	41°10'43,90"N	8°42'40,50"W
6	D6	Quebra-mar norte	41°10'39,98"N	8°42'39,36"W
7	D7	Quebra-mar norte	41°10'35,62"N	8°42'37,12"W
8	D8	Quebra-mar norte	41°10'29,72"N	8°42'35,2"W
9	D9	Quebra-mar norte	41°10'24,78"N	8°42'33,10"W
10	D10	Quebra-mar norte	41°10'19,08"N	8°42'29,03"W
16	D11	Molhe sul	41°10'37,22"N	8°42'20,97"W
17	D12	Molhe sul	41°10'34,38"N	8°42'16,38"W
18	D13	Molhe sul	41°10'32,64"N	8°42'10,96"W
20	D14	Molhe sul	41°10'34,90"N	8°42'1,41"W
22	D15	Molhe sul	41°10'38,73"N	8°41'55,81"W

O modelo DREAMS foi aplicado para todos os valores das gamas T, DIR e NM obtendo-se os resultados para todo o domínio de cálculo, com especial ênfase nos 15 pontos considerados de maior relevância (pontos D1 a D15). Assim, foram construídas as matrizes de transferência correspondentes a cada ponto D, capazes de relacionar os valores de agitação marítima obtidos pelo SWAN (em P14) com os valores em frente às diferentes estruturas do porto através dos índices de agitação e direção para todas as combinações de T (entre 4 s a 18 s, com passo de cálculo de 2 s) e de DIR (entre 180° a 360°, com passo de cálculo de 30°) na entrada do domínio de cálculo. Com base nessas matrizes, foram transferidos todos os valores obtidos no Ponto P14 para os 15 pontos D1 a D15, caracterizando o regime de agitação marítima em frente às diferentes estruturas do porto de Leixões.

Na tabela 5.7 apresenta-se uma análise estatística efetuada ao parâmetro de altura de onda significativa (H_s) para os pontos D1 a D15. Na tabela 5.8 apresenta-se uma análise estatística

realizada aos resultados do parâmetro período médio (T_m) para os mesmos pontos em análise, sendo este parâmetro igual para todos os 15 pontos.

Tabela 5.7 - Análise estatística do parâmetro Hs nos 15 pontos analisados pelo modelo DREAMS.

	Hs (m)														
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15
Média	1,92	1,95	1,68	1,86	1,83	1,58	1,43	1,79	1,58	1,59	0,37	0,44	0,45	0,51	0,44
Mediana	1,61	1,55	1,39	1,63	1,62	1,44	1,17	1,49	1,38	1,28	0,28	0,36	0,36	0,38	0,29
Moda	0,03	1,06	0,95	1,69	1,42	0,89	0,16	0,04	1,31	0,03	0,00	0,05	0,34	0,02	0,10
Desvio-padrão	1,56	1,45	1,22	1,16	1,09	0,94	1,13	1,42	1,20	1,30	0,33	0,37	0,37	0,46	0,45
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	13,3	12,8	10,9	11,1	12,1	10,6	11,3	13,3	13,7	11,5	2,9	3,5	3,9	4,8	4,6
Contagem	55032 Registos														

Tabela 5.8 - Análise estatística do parâmetro de T_m nos 15 pontos analisados pelo modelo DREAMS

T_m (s)	
D1 a D15	
Média	9,01
Mediana	9,10
Moda	9,10
Desvio-padrão	1,99
Mínimo	4,49
Máximo	16,69
Contagem	55031

Seguidamente apresenta-se o histograma relativo ao parâmetro Hs, para os pontos D1, D6, D8 e D14 (figura 5.18), de modo a obter-se uma representação comparativa da altura significativa entre os pontos estudados. São também apresentados os resultados referentes à direção média de

propagação de onda para os 15 pontos em análise, representado pela tabela 5.9. As séries temporais dos valores de H_s para os pontos relativos ao quebra-mar exterior norte (pontos D1 a D10) e ao quebra-mar sul (D11 a D15) assim como a série temporal relativa ao parâmetro período médio (T_m) são apresentadas no anexo X.

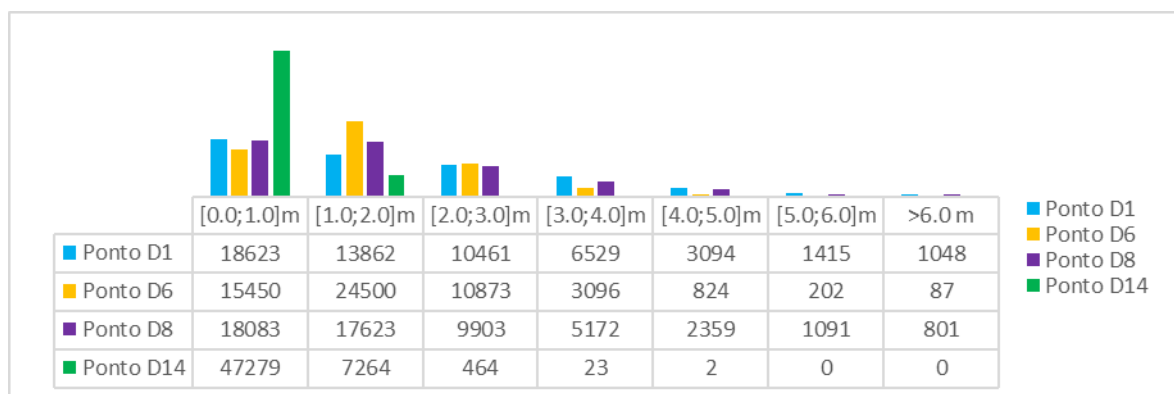


Figura 5.18 - Histogramas de alturas de onda significativas (Período de janeiro de 1979 a agosto de 2016).

Tabela 5.9 - Direção média de propagação de onda (θ_m) para os 15 pontos analisados

θ_m (°)										
	D1		D2		D3		D4		D5	
	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)
Quadrante nordeste	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Quadrante sudeste	0	0,00	0	0,00	699	1,27	0	0,00	0	0,00
Quadrante sudoeste	2659	4,83	4858	8,83	13826	25,12	8156	14,82	14503	26,35
Quadrante noroeste	52373	95,17	50174	91,17	40507	73,61	46876	85,18	40529	73,65
Contagem	55032 Registos									
	D6		D7		D8		D9		D10	
	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)
Quadrante nordeste	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Quadrante sudeste	2	0,00	0	0,00	0	0,00	4	0,01	6	0,01
Quadrante sudoeste	27758	50,44	15201	27,62	12369	22,48	15238	27,69	55013	99,97
Quadrante noroeste	27272	49,56	39831	72,38	42663	77,52	39790	72,30	13	0,02
Contagem	55032 Registos									
	D11		D12		D13		D14		D15	
	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)

Tabela 5.10 (continuação) - Direção média de propagação de onda (θ_m) para os 15 pontos analisados

	θ_m (°)									
	D1		D2		D3		D4		D5	
	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)	nº de ocorrências	(%)
Quadrante nordeste	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Quadrante sudeste	3317	6,03	2103	3,82	485	0,88	14	0,03	3081	5,60
Quadrante sudoeste	51715	93,97	52929	96,18	54547	99,12	54526	99,08	51951	94,40
Quadrante noroeste	0	0,00	0	0,00	0	0,00	492	0,89	0	0,00
Contagem	55032 Registos									

Através da análise dos resultados obtidos, verifica-se que:

- Comparativamente com o modelo SWAN, os resultados obtidos pelo modelo DREAMS evidenciam um aumento de altura significativa de onda considerável. Este fenómeno pode ser explicado devido às características batimétricas em frente ao porto de Leixões, uma vez que à medida que os fundos marítimos diminuem, a altura de onda tem tendência a aumentar;
- A altura de onda significativa diminui consideravelmente nos pontos relativos ao quebra-mar sul (D11 a D15), comparativamente com os resultados obtidos para os pontos do quebra-mar norte (D1 a D10);
- A maior altura de onda significativa teve o valor de 13,7 m sendo relativa ao ponto D9 em fevereiro de 1986, tal como observado no modelo SWAN;
- É também notória uma diferença na direção de propagação de onda entre os pontos do quebra-mar norte e do quebra-mar sul, sendo que os primeiros apresentam direções de onda provenientes de sudoeste e nordeste, e os segundos apresentam, quase na totalidade, ondas provenientes de sudoeste. A única exceção é relativa ao ponto D10 que, apesar de pertencer ao quebra-mar norte, apresenta quase na totalidade ondas provenientes do quadrante sudoeste.
- Não foram observadas direções provenientes do quadrante Nordeste em número significativo, para nenhum dos pontos analisados.

5.4. Caudal médio galgado

5.4.1. Introdução

Tal como mencionado no subcapítulo 2.3, recorreu-se ao uso da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 para calcular o volume de caudal médio galgado sobre as estruturas marítimas

do Porto de Leixões. Os resultados providos por esta ferramenta resultam dos dados de agitação marítima resultantes do modelo DREAMS, bem como dos dados relativos à geometria e características da estrutura marítima em questão.

Deste modo, procedeu-se à aplicação desta ferramenta, considerando os diferentes tipos de perfis das estruturas marítimas a estudar. Foram inseridas as 15 variáveis de entrada na ferramenta NN_OVERTOPPING2, sendo 3 associadas à caracterização da agitação marítima junto à estrutura (H_{m0} , t_{oe} , $T_{m-1,0}$ t_{oe} e β) e as restantes 12 associadas à geometria da estrutura (h , h_t , h_b , B_t , B , γ_f , α_d , α_b , α_u , R_c , A_c , G_c), sendo os resultados expressos em valores de caudal médio galgado por metro linear do coroamento da estrutura, q , ($l.s^{-1}/m$) e intervalos de confiança desta amostra de resultados. Esta ferramenta estima ainda o caudal médio galgado esperado no protótipo, i.e., o valor de q corrigido considerando alguns efeitos de escala (e.g. devido a escalar o tamanho do material do núcleo da estrutura de acordo com as suas dimensões e não com as velocidades no núcleo) e de modelo (e.g. a não consideração do vento no modelo físico) (Neves et al., 2012).

5.4.2. Condições de aplicação da ferramenta NN_OVERTOPPING2

A zona exposta de uma estrutura costeira comum é, usualmente, constituída por três partes, nomeadamente a parte inferior (ou pé de talude), a parte central (eventualmente com uma berma) e a parte superior (ou coroamento). A identificação das três partes referidas pode não ser clara, dependendo das condições hidráulicas e da geometria da estrutura. Assim, a mesma estrutura pode adotar diferentes valores de parâmetros de entrada relativamente à geometria da estrutura, devido aos diferentes níveis de água e ângulos de incidência da onda na estrutura (Coeveld et al., 2005).

A figura 5.19 representa o perfil de uma estrutura costeira, com as três partes constituintes bem definidas, onde a parte central (berma) corresponde à área que dista $1.5 \cdot H_{m0, toe}$ a cima e abaixo do nível de maré, e o coroamento e pé de talude, correspondem às áreas acima e abaixo da berma, respetivamente.

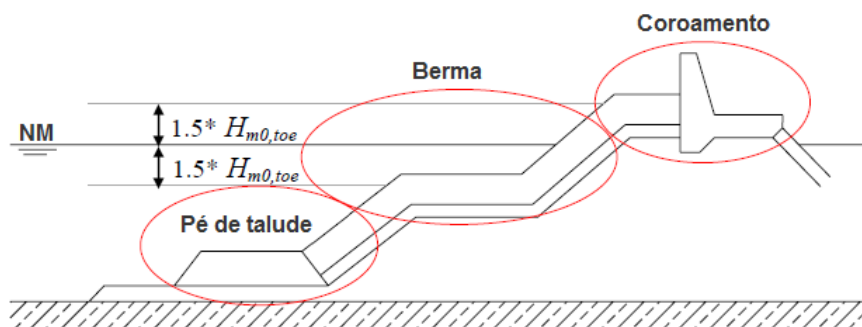


Figura 5.19 - Partes constituintes de uma estrutura costeira comum (adaptado de Coeveld et al., 2005)

Tendo em conta a importância das características das estruturas costeiras no fenómeno de galgamento, procedeu-se à caracterização dos quebra-mares norte e sul do porto de Leixões. Identifica-se, seguidamente, a localização dos pontos D1 a D15, assim como os correspondentes perfis das estruturas marítimas adjacentes. Apresenta-se também uma descrição das características mais significativas de cada perfil, para a utilização da ferramenta NN_OVERTOPPING2.

- **Perfil 3, correspondente aos pontos D1, D2, D3, D4 e D5**



Figura 5.20 - Localização do ponto D1 (vista da praia da Leça da Palmeira), estudado no modelo DREAMS e na ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

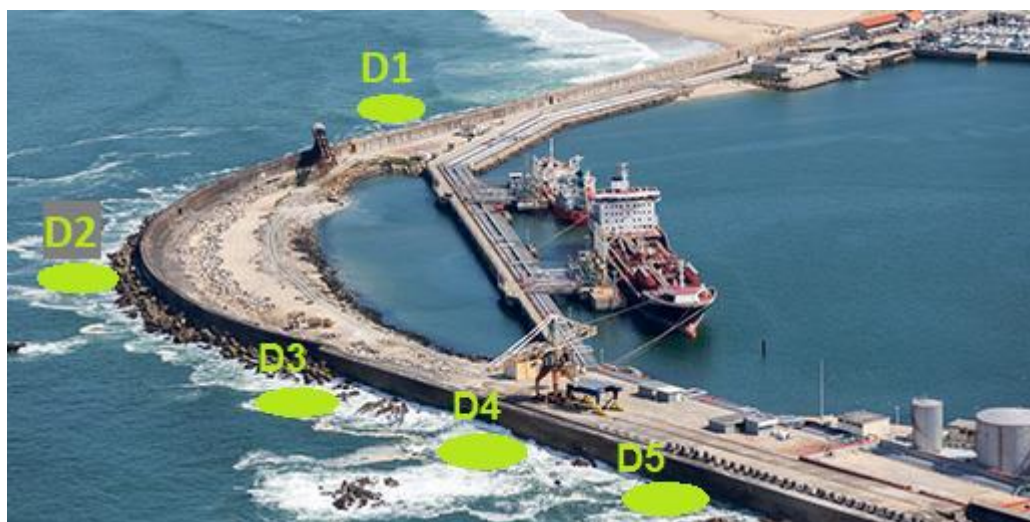


Figura 5.21 - Localização dos pontos D1, D2, D3, D4 e D5, estudados no modelo DREAMS e na ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (retirado de www.apdl.pt).

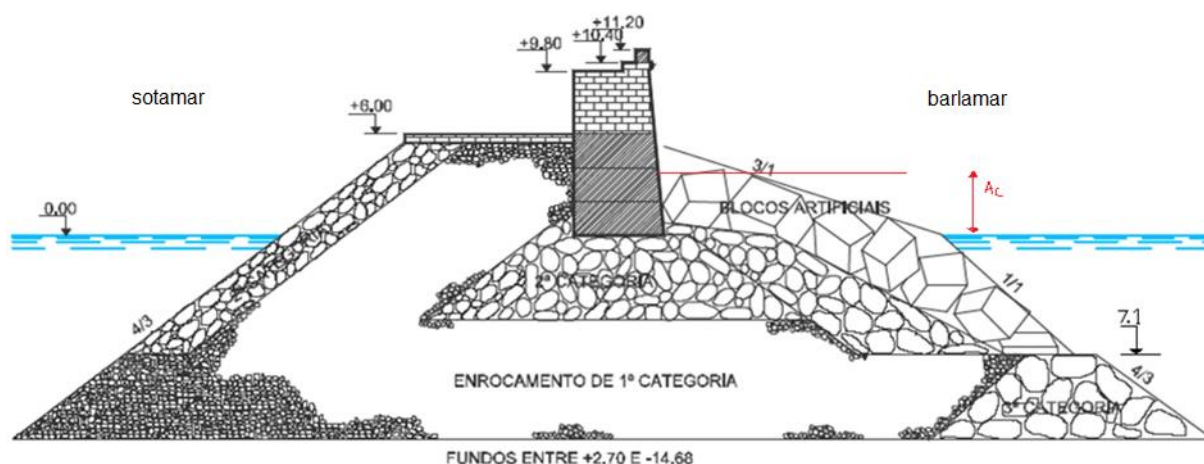


Figura 5.22 - Esquema representativo do perfil 3 (disponibilizado pela APDL).

Neste caso particular onde se pretende caracterizar o perfil 3 sem berma intermédia no talude, apresenta variações de inclinação do mesmo (ver figura 5.23), considera-se uma berma fictícia no ponto superior de variação de inclinação, onde será nulo o valor do parâmetro B , e admite-se a existência de uma banquetta de pé de talude fictícia no ponto inferior de variação de inclinação do talude, onde será nulo o parâmetro B_i .

Deste modo, o aspeto crítico desta análise reside na seleção do(s) 'trecho(s)' do talude que irá(ão) ser considerado(s). Para tal, pode considerar-se uma berma fictícia num ponto de alteração de inclinação do talude. O referido 'trecho' corresponderá à parte do talude que se situa entre o nível de maré e o nível definido por $1.5 \cdot H_s$ abaixo do nível de maré (Coeveld et al., 2005). Ou seja, o valor deste parâmetro varia com a variação de H_s e do NM.

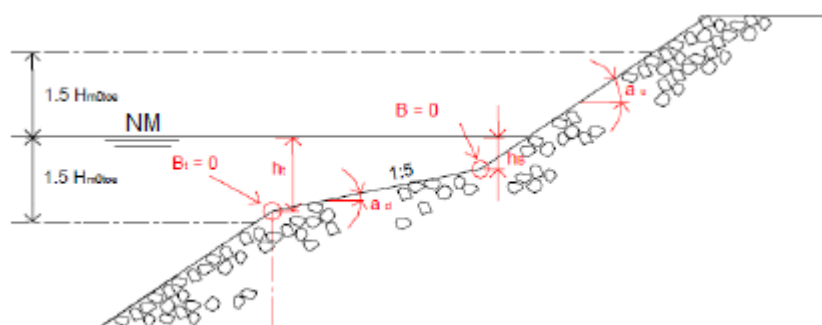


Figura 5.23 - Estrutura composta por mais de duas partes inclinadas (Coeveld et al., 2005).

Outro exemplo de uma situação excecional na definição dos parâmetros de entrada da ferramenta é o caso em que a berma de coroamento não é horizontal. Nesta situação é aconselhável

[illegible]

perfil 3 (figura 5.25) é relativo à parte central do quebra

$$\begin{cases} R_c/H_{m0toe} \geq 0.5 \rightarrow \gamma_f = \gamma_f - 0.05 \\ R_c/H_{m0toe} < 0.5 \rightarrow \gamma_f = \gamma_f \end{cases} \quad (5.1)$$

Os resultados de galgamento deste perfil serão correspondentes aos pontos D6, D7 e D8, tal como ilustrado na figura 5.26.



Figura 5.26 - Localização dos pontos D6, D7, D8, D9 e D10 estudados no modelo DREAMS e na ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (adaptado de Rosa-Santos, 2010).

- **Perfil 1, correspondente aos pontos D9 e D10**

O perfil 1 assemelha-se estruturalmente ao perfil 2. O único fator diferenciador entre os dois, é a existência de um quebra-mar submerso adjacente à estrutura de defesa. Para estudar o comportamento da agitação marítima na presença de um quebra-mar submerso, seria necessário recorrer à modelação física tridimensional. Bairrão (2014) utiliza esta técnica para demonstrar a influência que o quebra-mar submerso do porto de Leixões tem na agitação marítima e, consequentemente, nos efeitos de galgamento observados no quebra-mar norte. Através deste estudo, Bairrão (2014) conclui que as características geométricas do quebra-mar submerso, têm consequências direitas no regime de agitação marítima local, sendo a distância entre o quebra-mar submerso e o molhe norte, bem como a cota de coroamento do quebra-mar submerso, os fatores que

mais contribuíram para a redução do galgamento no quebra-mar norte. Uma vez que a ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 não abrange parâmetros indicados para a simulação de galgamento com influência de um quebra-mar submerso, a existência do mesmo foi desprezada para o presente estudo.

- **Perfil 3, correspondente aos pontos D11, D12 e D13**



Figura 5.27 - Localização dos pontos D11, D12 e D13, estudados no modelo DREAMS e na ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (retirado de www.apdl.pt).

Relativamente ao estudo dos pontos D11, D12 e D13, houve necessidade de adaptar o perfil da estrutura de defesa, uma vez que o mesmo não estava contemplado na lista de perfis disponibilizado pela APDL. Como tal, optou-se por considerar o perfil 3 como o mais indicado para caracterizar a estrutura em questão, uma vez que, através da visualização da mesma, se constatasem semelhanças significativas entre as duas.

Assim, para o estudo dos pontos D11, D12 e D13, avaliou-se o galgamento sobre a estrutura de perfil 3, cuja caracterização estrutural foi referida anteriormente, efetuando-se apenas alguns ajustes, tais como a mudança do manto constituído por cubos *antifer* ($\gamma_f = 0.5$) para blocos com uma camada ($\gamma_f = 0,52$).

- Perfil 24, correspondente aos pontos D14 e D15



Figura 5.28 - Localização dos pontos D14 e D15, estudados no modelo DREAMS e na ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (retirado de www.apdl.pt).

O perfil 24 (figura 5.29), à semelhança do o perfil 6, não apresenta uma berma definida, considerando-se nulos os parâmetros B [m], $\tan\alpha_B$ [-] e h_b [m].

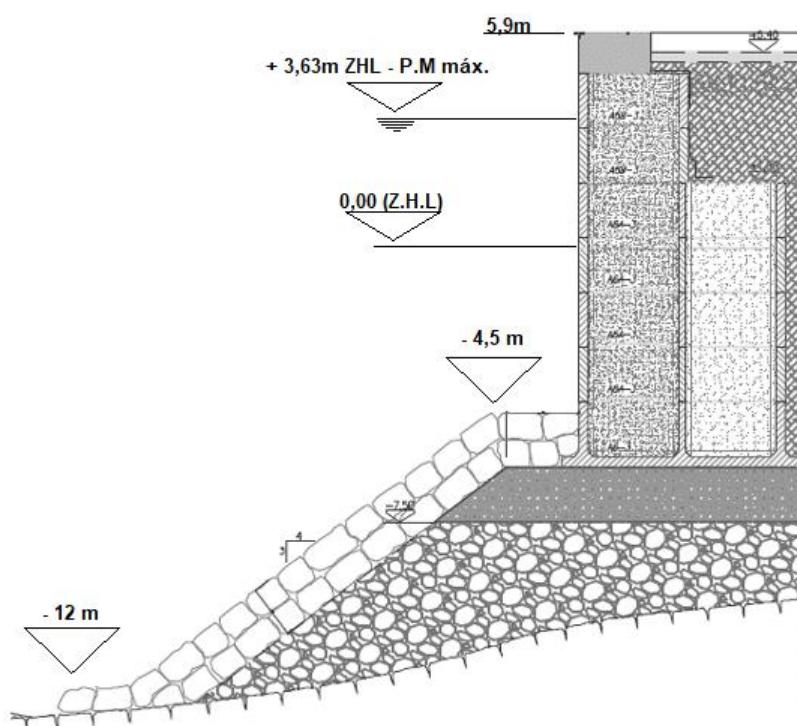


Figura 5.29 - Esquema representativo do perfil 24 (disponibilizado pela APDL).

Este perfil apresenta a peculiaridade da berma de coroamento estar abaixo do zero hidrográfico, pelo que se consideram iguais os parâmetros R_c (distância entre o nível de repouso da água e a cota do coroamento da parte impermeável da estrutura) e A_c (distância entre o nível de repouso da água e a cota da berma de coroamento da estrutura). Em relação ao parâmetro G_c , representativo da largura da berma de coroamento, é considerado nulo (figura 5.30).

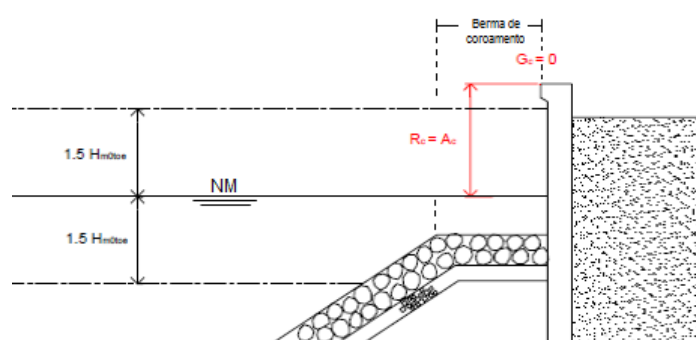


Figura 5.30 – Caso excepcional em que a berma de coroamento se localiza abaixo no nível de repouso da água (adaptado de Coeveld et al., 2005).

Finalmente, são apresentados o ângulo que a normal da estrutura faz com o Norte, para cada um dos pontos de estudo (quadro 5.1), bem como os valores atribuídos a todos os parâmetros necessários aos dados da ferramenta utilizada (quadro 5.3).

Quadro 5.1 - Ângulo formado pela normal à estrutura relativamente ao Norte.

Perfil	Ângulo da normal à estrutura com o Norte [°]
Quebra-mar Norte	
Perfil 3 D1	325
Perfil 3 D2	290
Perfil 3 D3	256
Perfil 3 D4	256
Perfil 3 D5	256
Perfil 2 D6	256
Perfil 2 D7	256
Perfil 2 D8	256
Perfil 1 D9	256
Perfil 1 D10	256
Quebra-mar Sul	
Perfil 3 D11	222

Quadro 5.2 (continuação) - Ângulo formado pela normal à estrutura relativamente ao Norte.

Perfil	Ângulo da normal à estrutura com o Norte [°]
Perfil 3 D12	222
Perfil 3 D13	222
Perfil 24 D14	148
Perfil 24 D15	148

Através do manual da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al., 2005), aplicaram-se todos os parâmetros necessários ao funcionamento da mesma, tendo em consideração as características geométricas e físicas das estruturas adjacentes aos 15 pontos de estudo.

Quadro 5.3 - Dados da ferramenta NN_OVERTOPPING_2 para os pontos analisados.

		h [m]	h _t [m]	B _t [m]	Y _f [-]	cot α _d [-]	cot α _u [-]	R _c [m]	B [m]	h _b [m]	tan α _b [-]	A _c [m]	G _c [m]
Quebra-mar Norte													
Perfil 6	D1	13,8 + NM	13,8 + NM	0	0,5	Variável	3	12,2 - NM	1,5	3 + NM	0	4,5 - NM	10
Perfil 3	D2	13,8 + NM	13,8 + NM	0	0,5	Variável	3	12,2 - NM	1,5	3 + NM	0	4,5 - NM	10
Perfil 3	D3	13,8 + NM	13,8 + NM	0	0,5	Variável	3	12,2 - NM	1,5	3 + NM	0	4,5 - NM	10
Perfil 3	D4	13,8 + NM	13,8 + NM	0	0,5	Variável	3	12,2 - NM	1,5	3 + NM	0	4,5 - NM	10
Perfil 3	D5	13,8 + NM	13,8 + NM	0	0,5	Variável	3	12,2 - NM	1,5	3 + NM	0	4,5 - NM	10
Perfil 2	D6	16,5 + NM	16,5 + NM	0	Variável	Variável	1,33(3)	15 - NM	2,72	1,77 + NM	0	11,5 - NM	4,09
Perfil 2	D7	16,5 + NM	16,5 + NM	0	Variável	Variável	1,33(3)	15 - NM	2,72	1,77 + NM	0	11,5 - NM	4,09
Perfil 2	D8	16,5 + NM	16,5 + NM	0	Variável	Variável	1,33(3)	15 - NM	2,72	1,77 + NM	0	11,5 - NM	4,09
Perfil 1	D9	17 + NM	17 + NM	0	Variável	Variável	1,33(3)	15 - NM	2,72	1+NM	0	11,5 - NM	4,09
Perfil 1	D10	17 + NM	17 + NM	0	Variável	Variável	1,33(3)	15 - NM	2,72	1+NM	0	11,5 - NM	4,09
Molhe Sul													
Perfil 3	D11	13,8 + NM	13,8 + NM	0	0,52	Variável	3	12,2 - NM	1,5	3 + NM	0	4,5 - NM	10
Perfil 3	D12	13,8 + NM	13,8 + NM	0	0,52	Variável	3	12,2 - NM	1,5	3 + NM	0	4,5 - NM	10
Perfil 3	D13	13,8 + NM	13,8 + NM	0	0,52	Variável	3	12,2 - NM	1,5	3 + NM	0	4,5 - NM	10
Perfil 24	D14	12 + NM	12 + NM	0	0,52	1,33(3)	1,33(3)	5,9 - NM	0	0	0	5,9 - NM	0
Perfil 24	D15	12 + NM	12 + NM	0	0,52	1,33(3)	1,33(3)	5,9 - NM	0	0	0	5,9 - NM	0

5.4.3. Análise de resultados

Foram obtidos os resultados da ferramenta NN_OVERTOPPING2, que se traduziu no caudal médio galgado por metro linear de estrutura, referente aos 15 pontos analisados (D1 a D15), para o período de janeiro de 1979 até agosto de 2016. A tabela 5.11 representa uma análise estatística dos valores de caudal, q , nos 15 pontos em estudo, após a utilização da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING.

Tabela 5.11 - Análise estatística do parâmetro q , obtido através da ferramenta NN_OVERTOPPING, nos 15 pontos em análise.

	q (l.s ⁻¹ /m)														
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15
Média	0,28	0,79	0,05	0,03	0,02	0,01	0,02	0,06	0,04	0,03	0,00	0,00	0,00	0,06	0,05
Mediana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Moda	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Desvio-padrão	3,44	8,83	0,53	0,32	0,34	0,17	0,43	0,83	0,86	0,38	0,01	0,01	0,02	0,87	0,53
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Máximo	250,00	442,30	57,53	30,05	45,59	24,19	40,47	68,94	93,53	37,25	0,36	0,49	0,74	131,50	57,53
Contagem	55032 Registos														

De seguida, apresenta-se a representação gráfica dos caudais médios galgados por unidade de comprimento do coroamento da estrutura, para os pontos D8 e D9 (figura 5.31 e figura 5.32 respetivamente), referentes aos pontos mais próximos do posto A. Estes gráficos apresentam uma comparação entre os valores de q obtidos, com o parâmetro gHm0Tm-1,0, utilizado frequentemente para dimensionar o caudal médio, de modo a se obter maior perceção comparativa entre as duas variáveis.

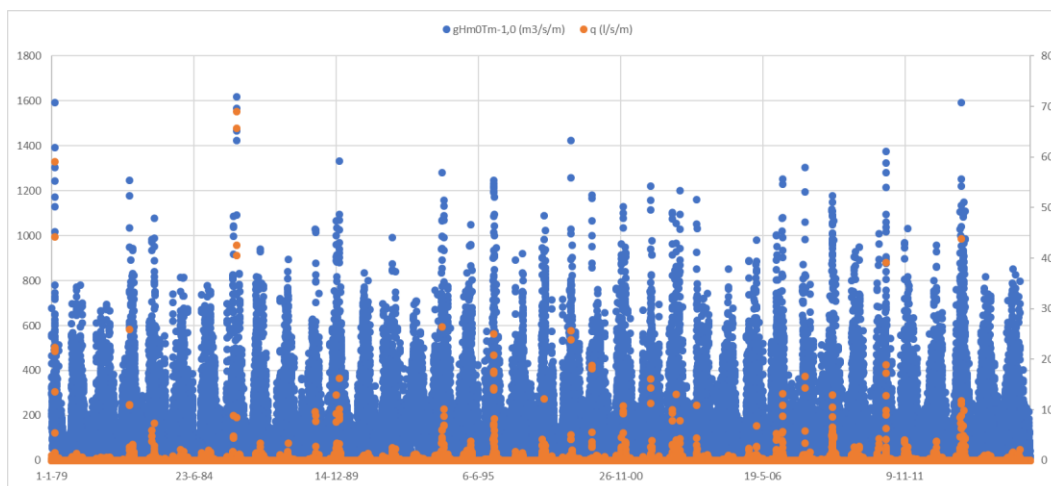


Figura 5.31 - Série temporal do parâmetro gHm0Tm-1,0 e do caudal médio galgado, q, no ponto D8, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

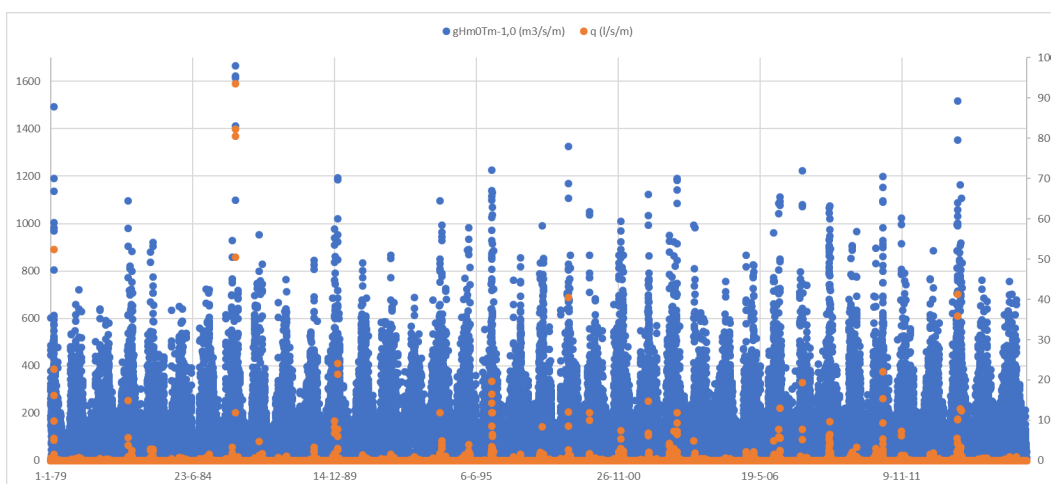


Figura 5.32 - Série temporal do parâmetro gHm0Tm-1,0 e do caudal médio galgado, q, no ponto D9, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

A tabela 5.12 representa as datas onde se verificaram os valores máximos de galgamento, para cada um dos pontos analisados. Através da mesma tabela, é também possível aferir sobre as características de agitação marítima em cada um dos pontos, para os valores de caudal máximo.

Tabela 5.12 - Características de agitação marítima, para cada um dos 15 pontos, nas datas onde se observaram valores máximos de caudal de galgamento (identificados a amarelo).

Datas dos registos de caudal de galgamento máximo						
Pontos	17-02-1986 (D4, D5, D6, D8, D9, D10, D14)	16-12-1989 (D3 e D15)	13-12-1982 (D1)	30-12-1998 (D2)	13-02-1979 (D7)	
D1	Hs (m)	13,30	7,22	7,53	9,00	12,79
	θ (°)	271,72	269,27	292,87	289,55	283,95
	q (l.s ⁻¹ /m)	85,22	0,57	250,00	69,04	54,79
D2	Hs (m)	10,34	7,78	9,66	10,39	11,48
	θ (°)	266,43	264,79	290,85	294,16	281,19
	q (l.s ⁻¹ /m)	167,90	43,75	150,00	442,30	423,00
D3	Hs (m)	10,93	7,08	7,74	9,50	10,30
	θ (°)	266,38	250,31	284,31	270,63	274,34
	q (l.s ⁻¹ /m)	31,41	57,53	0,58	8,08	22,93
D4	Hs (m)	11,15	8,04	7,06	7,89	10,40
	θ (°)	259,25	245,63	280,79	270,23	270,49
	q (l.s ⁻¹ /m)	30,05	4,50	1,30	7,77	29,74
D5	Hs (m)	12,05	7,70	7,22	6,59	9,06
	θ (°)	262,62	241,73	281,24	267,32	267,02
	q (l.s ⁻¹ /m)	45,59	3,31	1,46	2,23	13,00
D6	Hs (m)	10,64	5,91	6,06	5,98	8,16
	θ (°)	248,43	238,83	271,03	259,60	254,12
	q (l.s ⁻¹ /m)	24,19	0,78	0,69	1,29	6,30
D7	Hs (m)	11,30	8,66	5,89	9,85	10,95
	θ (°)	255,30	242,27	271,45	274,97	265,96
	q (l.s ⁻¹ /m)	31,03	7,19	0,61	31,01	40,47
D8	Hs (m)	13,31	8,74	8,14	9,35	11,84
	θ (°)	259,01	240,90	283,48	270,25	270,32
	q (l.s ⁻¹ /m)	68,94	7,58	2,94	23,92	59,09
D9	Hs (m)	13,29	8,28	5,82	9,87	11,10

Tabela 5.13(continuação) - Características de agitação marítima, para cada um dos 15 pontos, nas datas onde se observaram valores máximos de caudal de galgamento (identificados a amarelo).

Datas dos registos de caudal de galgamento máximo					
Pontos	17-02-1986 (D4, D5, D6, D8, D9, D10, D14)	16-12-1989 (D3 e D15)	13-12-1982 (D1)	30-12-1998 (D2)	13-02-1979 (D7)
θ (°)	252,35	241,87	278,54	273,40	264,56
q (l.s ⁻¹ /m)	82,23	6,73	0,56	40,49	52,47
Hs (m)	11,52	9,28	6,36	8,34	10,83
D10 θ (°)	229,74	213,46	235,71	235,27	229,64
D10 q (l.s ⁻¹ /m)	37,25	8,60	0,86	13,31	36,82
Hs (m)	2,81	2,89	1,34	1,36	1,85
D11 θ (°)	204,66	196,41	197,09	207,51	202,82
D11 q (l.s ⁻¹ /m)	0,26	0,36	0,00	0,00	0,00
Hs (m)	3,09	2,46	1,91	1,64	2,58
D12 θ (°)	211,45	211,40	201,83	216,27	215,72
D12 q (l.s ⁻¹ /m)	0,34	0,26	0,00	0,00	0,23
Hs (m)	3,92	3,53	1,62	2,91	3,00
D13 θ (°)	211,00	207,22	225,69	217,12	220,94
D13 q (l.s ⁻¹ /m)	0,74	0,69	0,00	0,50	0,36
Hs (m)	4,75	3,63	0,73	2,95	3,36
D14 θ (°)	195,15	206,79	209,92	204,10	209,44
D14 q (l.s ⁻¹ /m)	123,30	50,42	0,00	38,10	14,86
Hs (m)	3,84	3,75	1,99	2,30	3,51
D15 θ (°)	203,89	206,91	188,33	217,81	203,52
D15 q (l.s ⁻¹ /m)	31,41	57,53	0,58	8,08	22,93

Os resultados obtidos com a ferramenta NN_OVERTOPPING possibilitaram avaliar os presumíveis eventos de galgamento existentes nas estruturas marítimas do porto de Leixões. A comparação dos resultados de galgamento nos diferentes pontos de estudo permitiu avaliar quais as estruturas mais fustigadas pela agitação marítima, e quais as mais protegidas, considerando a localização e características físicas de cada estrutura marítima. Assim, conclui-se que:

- Os valores mais elevados de $gH_{m0}T_{m-1,0}$ e de H_{m0} correspondem aos valores mais elevados de q (ver figura 5.31 e figura 5.32);
- Recorrendo à informação contida na tabela 5.12, constata-se que os valores máximos de caudal estimados para os 15 pontos, correspondem a dois meses de inverno (dezembro e fevereiro), indo ao encontro dos estudos de agitação marítima realizados no local, que evidenciam a ocorrência de temporais predominantemente nestes dois meses.
- Os pontos D1 e D2 foram os que se estimaram maiores valores de q , estimando-se 250,00 e 442,32 l.s⁻¹/m. Relativamente ao ponto D1, o valor máximo de q foi obtido para uma altura de onda significativa de 7,53 metros e agitação marítima gerada no quadrante noroeste, apresentando uma direção de aproximadamente 292°. Para o ponto D2, o valor de q máximo foi obtido para $H_{m0} = 10,39$ e $\theta \approx 294^\circ$. Estes valores máximos foram ambos estimados no mês de dezembro, nos anos de 1982 e 1998 (D1 e D2 respetivamente);
- Ainda relativamente ao quebra-mar norte, e ao longo da mesma estrutura, constata-se que os pontos D3, D4, D5, e D6, apresentam valores máximos de q significativamente mais baixos que os pontos D1 e D2. Tendo em consideração o facto de todos estes pontos pertencerem à estrutura de perfil 3, e que o parâmetro de altura significativa de onda não varia de modo significativo entre eles (facto evidenciado nos resultados do modelo DREAMS, (secção 5.3.3), pode concluir-se que o parâmetro direção de onda é um fator que condiciona fortemente o fenómeno de galgamento. Neste caso, as estruturas cuja normal forma com o Norte um ângulo maior (estruturas relativas aos pontos D1 e D2) apresentam menor capacidade de absorver o impacto das ondas geradas no quadrante noroeste;
- O caudal máximo estimado nos pontos D4, D5 e D6, foi obtido no dia 2 de fevereiro de 1986, evidenciando resultados coerentes entre pontos de estudo pertencentes a trechos adjacentes. O caudal máximo registado no ponto D3 foi no dia 13 de dezembro de 1989 ($q \approx 30$ l.s⁻¹/m);
- Nos pontos D8 e D9, estimaram-se valores de q máximos de aproximadamente 70 e 94 l.s⁻¹/m, respetivamente, resultados que demonstram a ocorrência de galgamentos no trecho adjacente ao posto A, tal como descrito pela autoridade portuária. De facto, a média de galgamento no ponto D8 (0,06 l.s⁻¹/m) é a mais elevada do quebra-mar norte, excluindo apenas o trecho avaliado no ponto D2 (0,79 l.s⁻¹/m), evidenciando a ocorrência de galgamentos frequentes na estrutura protetora do posto A. Os valores máximos de galgamento na estrutura protetora do posto A, ainda que elevados, são

menores que os registados nos pontos D1 e D2, fato que também pode ser explicado pela existência de um defletor de onda no trecho da extremidade sul deste quebra-mar;

- Ainda relativamente aos pontos (D8, D9 e D10), os valores máximos de caudal de galgamento foram estimados no dia 17 de fevereiro de 1986, demonstrando coerência de resultados para o trecho correspondente à extremidade sul do quebra-mar norte. Estes valores máximos foram estimados para ondas geradas no quadrante oeste (θ (D8) $\approx 259^\circ$ e θ (D9) $\approx 252^\circ$). Neste trecho do quebra-mar norte, as ondas geradas no quadrante oeste são aquelas que demonstram maiores consequências de galgamento nas estruturas, facto explicado pela orientação desta estrutura marítima que, formando a normal da estrutura um ângulo de 256° relativamente ao Norte, origina menor refração das ondas provenientes deste quadrante, provocando galgamentos mais gravosos no local (ver figura 5.33)

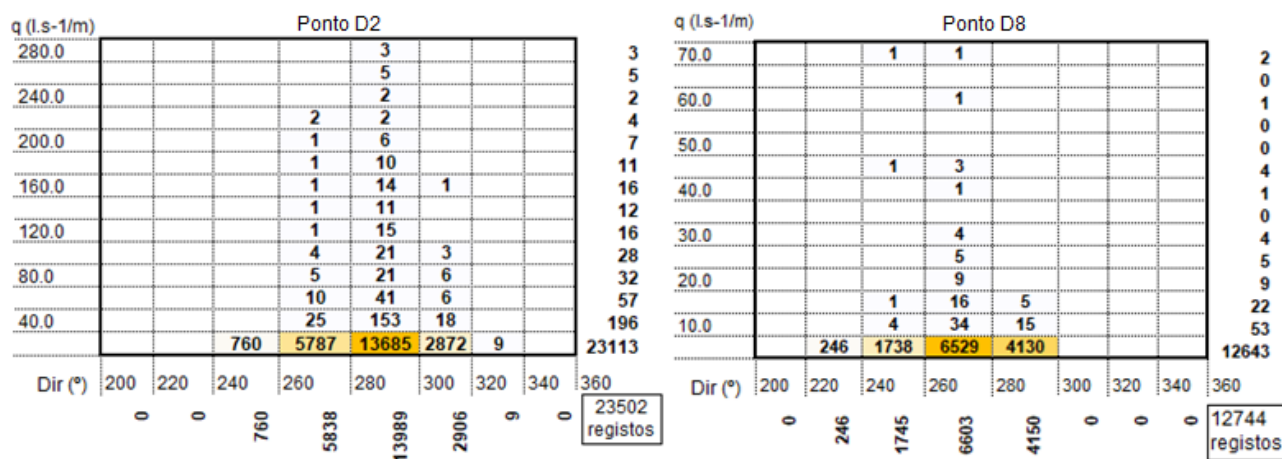


Figura 5.33 - Histogramas relativos aos registos de q (l.s-1/m) e direção de onda ($^\circ$) para os pontos D2 e D8.

- Analisando os resultados do molhe sul, é notório que não existem episódios de galgamento significativos para os pontos D11, D12 e D13. O valor de q mais elevado para estes pontos foi $0,74 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$ estimado no ponto D13. Através destes resultados conclui-se que a estrutura marítima relativa à cabeça do molhe sul, se encontra bem protegida da agitação marítima proveniente do quadrante oeste, devido à presença do quebra-mar norte, que origina uma zona de acalmia sentida neste trecho.
- Contrastando com os pontos anteriores, os pontos D14 e D15 apresentam eventos de galgamento significativos. Estes pontos, devido à sua localização mais próxima à praia de Matosinhos, e mais distantes do quebra-mar norte, estão menos protegidos da agitação marítima, principalmente de ondas geradas no quadrante sudoeste (180° a 270°). Os valores de galgamento máximo foram $131,50$ e $57,53 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$ para os pontos

D14 e D15, em fevereiro de 1986 e dezembro de 1989 respetivamente. Contudo, recorrendo à informação dos histogramas presentes na figura 5.34, constata-se que os valores máximos de galgamento para estes pontos foram episódios isolados, sendo muito superiores ao caudal de galgamento previsto para este trecho do quebra-mar sul (maioritariamente inferior a $10 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$).

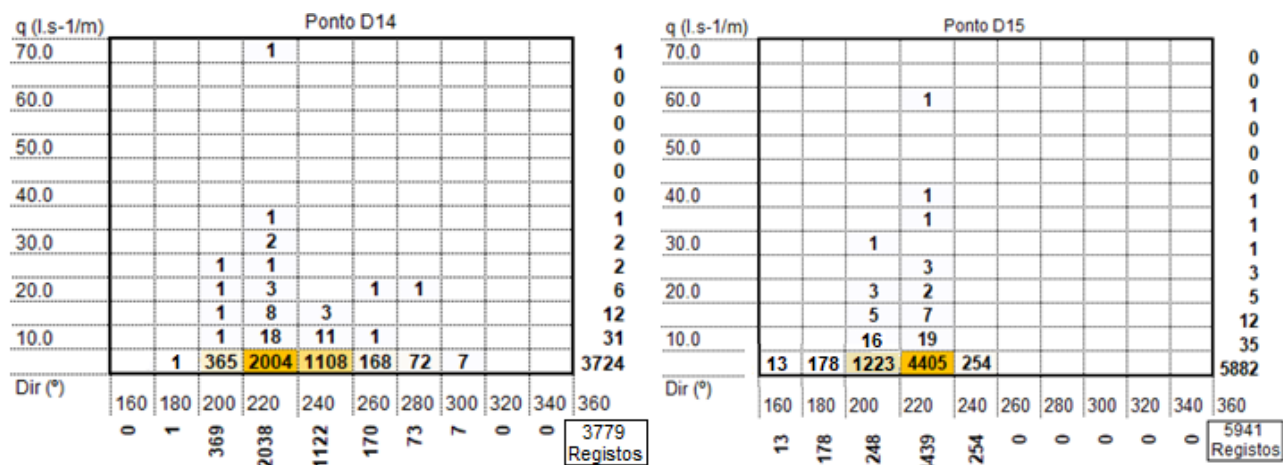


Figura 5.34 - Histogramas relativos aos registos de q ($\text{l.s}^{-1}/\text{m}$) e direção de onda ($^{\circ}$) para os pontos D14 e D15 (quadros da direita e esquerda, respetivamente).

- Os valores elevados de galgamento nestes pontos, poderão ser motivados pelas características da estrutura neste trecho do quebra-mar sul, onde se verifica que a berma de coroamento desta estrutura se encontra abaixo do zero hidrográfico (figura 5.29), originando a rebentação da onda na parede vertical, e possibilitando alguns episódios de caudal de galgamento mais elevados.
- Constata-se ainda que o local do ponto D15 (mais afastado do quebra-mar norte) se encontra mais desprotegido para ondas provenientes do quadrante sul, havendo 178 estimativas de galgamento originados por ondas com esta direção.

6. AVALIAÇÃO DE RISCO PARA O PORTO DE LEIXÕES

6.1. Valores admissíveis

O presente subcapítulo tem o intuito de comparar os valores de caudal médio galgado por metro linear de estrutura ($\text{l.s}^{-1}/\text{m}$), obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2, com os valores admissíveis de galgamento propostos por Pullen et al. (2007), mencionados na secção 2.4 - limites admissíveis para galgamentos em estruturas marítimas. Tendo em conta as características das atividades desenvolvidas em cada trecho estudado, propuseram-se os seguintes valores admissíveis de galgamento para cada um dos 15 pontos em análise, com base na informação disponibilizada no quadro 2.1, quadro 2.2, quadro 2.3 e quadro 2.4:

- O Ponto D1, localizado no quebra-mar Norte e no trecho mais próximo à praia de Leça da Palmeira, corresponde a uma estrutura de defesa frontal podendo apresentar danos nas vias de circulação localizadas atrás desta estrutura (limite de $200 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$). Neste local, é permitida apenas a presença de pessoal treinado, com funções a desenvolver no Terminal de Petroleiros (limite de $1 - 10 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$). A circulação de veículos é realizada na via de circulação, que se localiza a 10 metros da estrutura de defesa (limite de $10 - 50 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$), destacando-se a presença de equipamentos e edifícios localizados a 30 e 20 metros da estrutura, respetivamente (limites $0.4 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$ para os equipamentos e $1 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$ para os edifícios);
- Os pontos D2 e D3 estão localizados na proteção exterior do molhe Norte, em frente aos postos B e C do Terminal Petrolífero. Como tal, a passagem de peões só é permitida a funcionários ou pessoal autorizado, que seja treinado, com equipamento e calçado adequado e com perceção da existência de possibilidade de se molhar (limite de $1 - 10 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$). Trata-se de uma defesa frontal que pode ter danos em zonas de circulação pavimentadas localizadas atrás da estrutura de defesa (limite de $200 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$). A circulação de veículos de transporte ocorre na via de circulação existente para o efeito, que dista 50 e 30 metros do coroamento da estrutura dos pontos D2 e D3 respetivamente (limite de $10 - 50 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$). Realça-se a existência de equipamentos no local, tais como redes de tubagem, gruas e equipamentos de amarração, que podem ser danificados, distando 145 e 100 metros dos pontos D2 e D3 respetivamente. Uma vez que este trecho funciona como proteção aos postos B e C deste terminal, existe a possibilidade de ocorrência de danos em grandes navios aí atracados (limite de $10 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$), ainda que os respetivos postos de acostagem estejam a uma distância considerável da estrutura (145 e 100 metros dos pontos D2 e D3);
- Os pontos D4 e D5, localizados na zona central do quebra-mar Norte, e cuja estrutura pode ter danos em zonas de circulação pavimentadas localizadas atrás da mesma, a

uma distância de 30 metros. Tal como nos trechos anteriores, só se permite entrada a pessoal autorizado, treinado e devidamente equipado (limite de $1 - 10 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$). É neste local que se encontra a maioria dos equipamentos e edifícios presentes no terminal de petroleiros, uma vez que se aproveitou a área existente entre o antigo quebra-mar Norte de Leixões e a nova estrutura. Assim, poderá haver danos em edifícios como o edifício administrativo ou a central de bombagem de incêndios, ou em equipamentos nomeadamente a rede de tubagens ou os tanques de armazenamento de combustível, localizados a 60 metros do coroamento da estrutura (limites $0.4 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$ para os equipamentos e $1 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$ para os edifícios);

- Relativamente aos pontos D6 e D7, correspondem à estrutura de defesa que se prolonga até à cabeça do quebra-mar Norte, sendo uma defesa frontal (limite de $200 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$). A via de circulação existente neste trecho do quebra-mar Norte está localizada imediatamente atrás da estrutura de defesa, admitindo-se um limite para veículos de $0,05 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$, uma vez que, apesar da velocidade dos veículos ser reduzida, poderá haver situações de galgamento projetado com grande velocidade ou com jatos de água a cair na via. Também este trecho é exclusivo à presença de funcionários treinados e equipados devidamente (limite de $1 - 10 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$), não havendo possibilidade de ocorrência de danos nos navios atracados;
- Os pontos D8, D9 e D10 são análogos aos pontos anteriores, uma vez que estão localizados ao longo da mesma estrutura. A única diferença em termos de valores admissíveis a registar nestes pontos, é relativa às consequências danosas em navios atracados no posto A. Devido à localização deste posto, que se encontra entre os pontos de estudo D8 e D9, o galgamento observado na estrutura poderá causar danos em equipamentos (limites $0.4 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$) e em grandes navios aí atracados (limite de $10 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$). Relativamente ao ponto D10, localiza-se na cabeça do quebra-mar Norte, onde foi construído um farol (limite de $1 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$), sendo uma vez mais, permitida a passagem a funcionários, ou pessoal autorizado e treinado (limite de $1 - 10 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$);
- Os pontos D11, D12 e D13 estão localizados no quebra-mar sul, perto da cabeça do molhe. Este local é utilizado para o acesso ao porto de recreio, admitindo-se valores admissíveis de galgamento de $0,03 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$ para pessoas, entendendo-se que as pessoas presentes no local estão desprevenidas e sem observação da agitação incidente, com vestuário inadequado para se molharem, propiciando tropeções ou quedas. As embarcações atracadas no porto de recreio poderão ser danificadas aquando os fenómenos de galgamento, admitindo-se um limite de $10 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$, para embarcações localizadas a 10 metros da estrutura;

- Finalmente, os pontos D14 e D15 localizam-se na defesa frontal do terminal de Cruzeiros (limite de $200 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$ para a estrutura). Como tal, este trecho é caracterizado pela presença de passageiros dos navios de cruzeiro, assim como pessoas que se queiram dirigir ao edifício central do terminal, encontrando-se desprevenidas e sem observação da agitação marítima incidente (limite de $0,03 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$). A circulação de veículos é realizada para movimentação de passageiros, sendo realizada a velocidade moderada. No entanto, a possível existência de galgamento projetado com grande velocidade ou com jatos de água a cair na via, origina valores de galgamento admissíveis mais reduzidos (limite de $0,05 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$ para veículos). Neste local estão presentes equipamentos e edifícios direcionados para a receção de passageiros (limites $0,4 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$ para os equipamentos e $1 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$ para os edifícios). No terminal de cruzeiros está também localizado o cais fúlvio marítimo para acostagem de embarcações com o propósito de proporcionar itinerários turísticos no rio Douro, localizado a 60 metros do coroamento da estrutura (limite de $10 \text{ l.s}^{-1}/\text{m}$).

O quadro 6.1 representa o resumo dos valores limite de caudal admissível atribuídos a cada ponto em estudo, assim como a distância dos diferentes sectores relativamente ao coroamento da estrutura marítima.

Quadro 6.1 - Valores críticos de caudal médio de galgamento e distância de avaliação do galgamento, quando aplicável.

Valores críticos de caudal médio de galgamento (l.s ⁻¹ /m)						
Pontos	Estrutura	Pessoas	Veículos	Edifícios	Equipamentos	Navios
D1	200	1	0.05 (10 m)	1 (30 m)	0.4 (20 m)	-
D2	200	1	10 (50 m)	-	0.4 (145 m)	10 (145 m)
D3	200	1	10 (30 m)	-	0.4 (100 m)	10 (100 m)
D4	200	1	10 (30 m)	1	0.4 (60m)	-
D5	200	1	10 (30 m)	1	0.4 (60m)	-
D6	200	1	0.05	-	0.4 (20 m)	-
D7	200	1	0.05	-	0.4	-
D8	200	1	0.05	-	0.4	10
D9	200	1	0.05	-	0.4	10
D10	200	1	0.05	-	0.4	-
D11	200	0.03	0.05	-	0.4	10
D12	200	0.03	0.05	-	0.4	10
D13	200	0.03	0.05	1	0.4	10
D14	200	0.03	0.05	1	0.4	10 (15 m)
D15	200	0.03	0.05	1	0.4	10 (60 m)

6.2. Grau de probabilidades de ocorrência

O grau de probabilidade de ocorrência de galgamentos é atribuído em função do quociente entre o número de vezes que os limites são ultrapassados, e o número total de registos. Assim, atribui-se ao grau de probabilidade de ocorrência, um valor entre 1 e 5, tendo por base a representação gráfica da probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis em cada ponto (figura 6.1), para as diferentes atividades, e a informação descrita no quadro 3.1, para o conjunto total de 55032 registos.

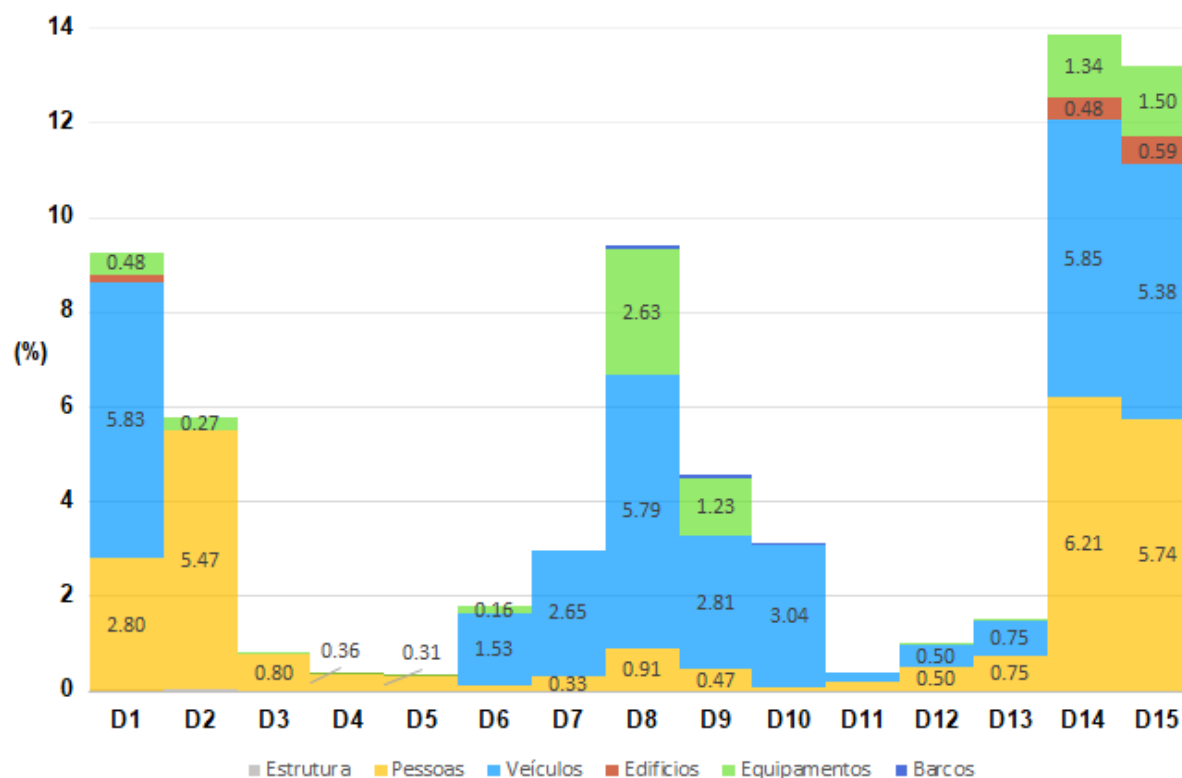


Figura 6.1 - Probabilidade de ocorrência de galgamento superior aos valores admissíveis, nos 15 pontos em estudo, discriminados por sector.

Quadro 6.2 – Número, probabilidade e grau de ocorrências de galgamento superior aos valores admissíveis para os pontos analisados.

Ponto		Estrutura	Pessoas	Veículos	Edifícios	Equipamentos	Navios
D1	Número de ocorrências	3	1540	3210	87	265	-
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,01	2,80	5,83	0,16	0,48	-
	Grau de probabilidade	1	2	2	1	1	-
D2	Número de ocorrências	26	3012	0	-	149	0
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,05	5,47	0,00	-	0,27	0,00
	Grau de probabilidade	1	2	1	-	1	1
D3	Número de ocorrências	0	438	0	-	1	0
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,00	0,80	0,00	-	0,00	0,00
	Grau de probabilidade	1	1	1	-	1	1
D4	Número de ocorrências	0	198	0	1	3	-
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,00	0,36	0,00	0,00	0,01	-
	Grau de probabilidade	1	1	1	1	1	-

Quadro 6.2 (continuação)– Número, probabilidade e grau de ocorrências de galgamento superior aos valores admissíveis para os pontos analisados.

Ponto		Estrutura	Pessoas	Veículos	Edifícios	Equipamentos	Navios
D5	Número de ocorrências	0	171	0	2	2	-
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	-
	Grau de probabilidade	1	1	1	1	1	-
D6	Número de ocorrências	0	65	843	-	87	-
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,00	0,12	1,53	-	0,16	-
	Grau de probabilidade	1	1	2	-	1	-
D7	Número de ocorrências	0	183	1459	-	-	-
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,00	0,33	2,65	-	-	-
	Grau de probabilidade	1	1	2	-	-	-
D8	Número de ocorrências	0	501	3186	-	1450	48
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,00	0,91	5,79	-	2,63	0,09
	Grau de probabilidade	1	1	2	-	2	1
D9	Número de ocorrências	0	259	1544	-	678	32
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,00	0,47	2,81	-	1,23	0,06
	Grau de probabilidade	1	1	2	-	2	1
D10	Número de ocorrências	0	36	1671	-	-	12
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,00	0,07	3,04	-	-	0,02
	Grau de probabilidade	1	1	2	-	-	1
D11	Número de ocorrências	0	114	114	-	0	0
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,00	0,21	0,21	-	0,00	0,00
	Grau de probabilidade	1	1	1	-	1	1
D12	Número de ocorrências	0	275	275	-	1	0
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,00	0,50	0,50	-	0,00	0,00
	Grau de probabilidade	1	1	1	-	1	1
D13	Número de ocorrências	0	415	415	0	13	0
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,00	0,75	0,75	0,00	0,02	0,00
	Grau de probabilidade	1	1	1	1	1	1
D14	Número de ocorrências	0	3416	3222	263	736	0
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,00	6,21	5,85	0,48	1,34	0,00
	Grau de probabilidade	1	2	2	1	2	1
D15	Número de ocorrências	0	3160	2958	325	825	0
	Probabilidade de ocorrência [%]	0,00	5,74	5,38	0,59	1,50	0,00
	Grau de probabilidade	1	2	2	1	2	1

Com base na informação exposta no quadro 6.2, conclui-se que:

- O grau máximo de probabilidade de ocorrência registado nos 15 pontos é o grau 2, não havendo registo de valores de galgamento admissível superiores a 10% para nenhum dos pontos estudados;
- O setor “Estruturas” é o que apresenta menor número de ocorrências de galgamento acima do valor admissível estipulado, havendo registo destas situações exclusivamente nos pontos D1 e D2. No entanto, e apesar de registo destas ocorrências, o sector “Estruturas” insere-se no grau 1 de probabilidade de ocorrência improvável para todos os pontos avaliados;
- Tal como as estruturas, os setores “Edifícios” e “Navios” também não excedem o grau 1, referente à probabilidade de ocorrência improvável, para o conjunto total de 15 pontos. As ocorrências de galgamento superiores aos valores admissíveis a registar no sector “Edifícios” referem-se aos pontos D14 e D15 (263 e 325 ocorrências respetivamente), pertencentes à estrutura de defesa do Terminal de cruzeiros. No sector “Navios” as únicas ocorrências de galgamento não admissível registam-se nos pontos D9 e D10, localizados na cabeça do quebra-mar norte, concernente à localização do Posto A;
- O setor “Veículos” é o que apresenta maior grau de probabilidade de ocorrência (grau 2) em mais pontos de estudo, nomeadamente nos pontos D1, D6, D7, D8, D9, D10, D14 e D15, totalizando um conjunto de 8 pontos. Estes valores podem ser explicados pela presença da via de circulação imediatamente adjacente ao coroamento da estrutura marítima;
- O setor “Pessoas” contabiliza 4 pontos cujo grau de probabilidade é superior a 1%, inserindo-se na probabilidade de ocorrência raro. Estes pontos são concernentes ao início do quebra-mar norte (pontos D1 e D2) e ao Terminal de Cruzeiros (Pontos D14 e D15). O ponto D14 é aquele que apresenta maior probabilidade de ocorrência de galgamentos superiores aos admissíveis para o sector “Pessoas”, com um valor superior a 6%. Esta percentagem de ocorrência é a mais elevada comparativamente com todos os setores em estudo;
- Os pontos D14 e D15 são os que apresentam mais registos de grau de probabilidade de ocorrência raro (grau 2), contabilizando este grau em 3 dos 6 sectores estudados (“Pessoas”, “Veículos” e “Equipamentos”).

6.3. Grau de consequência

Para a atribuição do grau de consequência, recorreu-se ao guia de orientação proposto no quadro 3.2, e ao tipo de atividades desenvolvidas em cada ponto de estudo, de modo a determinar qual o tipo de consequências que o fenómeno de galgamento provoca nos locais abrangidos pelos mesmos. Os graus de consequência foram atribuídos para os mesmos sectores utilizados na atribuição do grau de probabilidade, adicionando ainda os sectores “Ambiente” e “Gestão portuária”, culminando no quadro 6.3.

Quadro 6.3 - Grau de consequências considerado em cada ponto.

Ponto	Grau de consequência						
	Pessoas	Ambiente	Gestão portuária	Património			
				Edifícios	Equipamentos	Estruturas	Veículos
D1	10	2	2	5	10	10	5
D2	10	2	10	-	10	10	5
D3	10	2	10	-	10	10	5
D4	10	2	10	-	10	10	5
D5	10	2	10	-	10	10	5
D6	10	2	10	-	10	10	5
D7	10	2	25	-	10	25	5
D8	10	2	25	-	10	25	5
D9	10	2	25	-	10	25	5
D10	5	1	2	-	2	2	5
D11	10	2	2	-	10	5	10
D12	10	2	2	-	10	5	10
D13	10	2	2	1	10	5	10
D14	10	2	2	5	10	5	10
D15	10	2	2	5	10	5	10

Através dos resultados de atribuição do grau de consequência para os 15 pontos em análise, conclui-se que:

- Os pontos D7, D8 e D9 são os que apresentam maior grau de consequência (grau 25). Este grau é relativo aos sectores “Gestão Portuária” e “Estruturas”, e deve-se ao facto destes pontos estarem localizados nas proximidades do Posto A, cuja inoperacionalidade é causadora de restrições muito sérias às operações de carga e descarga havendo perda de trocas comerciais durante muito tempo e má publicidade internacional para o porto de Leixões. Em termos da estrutura, e estando estes pontos

localizados na extremidade do quebra-mar Norte, admite-se grau 25, uma vez que este quebra-mar é representativo da primeira defesa contra a agitação marítima, tendo os danos na estrutura consequências e prejuízos catastróficos para o porto;

- A todos os pontos em estudo, excetuando o ponto D10, foi atribuído grau 10 para o sector referente a pessoas. Tantos os quebra-mar Norte como o molhe Sul, apresentam um aglomerado significativo de pessoas, sejam funcionários do Terminal de Petroleiros, ou passageiros no Terminal de Cruzeiros e porto de recreio, sendo um fator sensível aquando a ocorrência de tempestades marítimas;
- Para o setor “Veículos”, foi atribuído grau de consequência 5 para os pontos localizados no quebra-mar Norte, e grau 10 para os pontos localizados no molhe Sul. Esta diferença advém da tipologia de veículos existentes nas atividades desenvolvidas nestes terminais, estando os veículos utilizados no Terminal de Petroleiros direcionados para operações de carga e descarga, cujos danos provocados pelo galgamento das estruturas não levam à sua paragem temporária. No Terminal de Cruzeiros e no porto de Recreio, os veículos são utilizados para o transporte de passageiros estando mais sujeitos às consequências de galgamento, que poderão levar a uma paragem prolongada.

6.4. Grau de risco

O grau de risco é calculado pela multiplicação entre o grau de probabilidade e o grau de consequência de ocorrência de galgamentos nos locais estudados, sendo a denominação do grau de risco atribuída de acordo com as indicações do quadro 3.1. Utilizou-se esta metodologia de cálculo para os 15 pontos em estudo, culminando no quadro 6.4, representativo do grau de risco calculado para os pontos D1 a D15.

Quadro 6.4 - Grau de Risco de galgamento em cada ponto analisado.

Ponto	Grau de Risco de galgamento				Descrição
	Grau de probabilidade	Grau de consequência	Grau de Risco		
D1	2	10	20		Risco indesejável
D2	2	10	20		Risco indesejável
D3	1	10	10		Risco reduzido
D4	1	10	10		Risco reduzido
D5	1	10	10		Risco reduzido
D6	2	10	20		Risco indesejável
D7	2	25	50		Risco inaceitável

Quadro 6.5 (continuação) - Grau de Risco de galgamento em cada ponto analisado.

Ponto	Grau de Risco de galgamento			Descrição
	Grau de probabilidade	Grau de consequência	Grau de Risco	
D8	2	25	50	Risco inaceitável
D9	2	25	50	Risco inaceitável
D10	2	5	10	Risco reduzido
D11	1	10	10	Risco reduzido
D12	1	10	10	Risco reduzido
D13	1	10	10	Risco reduzido
D14	2	10	20	Risco indesejável
D15	2	10	20	Risco indesejável

De acordo com os resultados obtidos, os pontos D7, D8 e D9 são os que apresentam grau de risco mais elevado (grau 50), com denominação de risco inaceitável. Para estes pontos será imperativo proceder-se a medidas de controlo do risco, através da eliminação dos fatores de risco ou diminuição da probabilidade de ocorrência de galgamentos inadmissíveis.

Relativamente aos pontos D1, D2, D6, D14 e D15, apresentam grau de risco indesejável (grau 20), havendo necessidade de adoção de medidas razoáveis em termos práticos para diminuir o risco, bem como uma investigação detalhada e plano de monitorização.

Para os restantes pontos, determinou-se um grau de risco reduzido (grau 10), resultando na aceitabilidade do risco nestes pontos, desde que se admita um conjunto de medidas para o seu controlo. Os locais que apresentam menor risco de galgamento são referentes aos pontos D3, D4 e D5, onde se verificou um afastamento considerável entre o local de operações desenvolvidas no Terminal, e a estrutura marítima suscetível a eventos de galgamento. Já os pontos D11, D12 e D13, pertencentes à estrutura marítima do porto de recreio do molhe Sul, também apresentam grau de risco reduzido, uma vez que a agitação marítima neste local é influenciada pela ação do quebra-mar norte, não ocorrendo episódios de galgamento significativos.

6.5. Mapa de risco

A figura 6.2 representa o mapa de risco para o porto de Leixões, com indicação do grau de risco definido em cada ponto de estudo, e respetiva localização. Neste mapa, os pontos onde se avaliou o risco de galgamento das estruturas estão representados por bandeiras com cores representativas do respetivo grau de risco definido para cada local.



Figura 6.2 - Representação gráfica do grau de risco de galgamento nos 15 pontos de estudo, determinado pela metodologia adotada (adaptado de Google Earth).

7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. Principais resultados

A presente dissertação teve como principal objetivo avaliar o risco de ocorrência de galgamentos nas estruturas marítimas existentes no porto de Leixões, localizado no concelho de Matosinhos, Região Norte de Portugal.

Este estudo trata-se da primeira abordagem em termos de avaliação de risco de galgamento para o porto de Leixões, com o conjunto das duas principais estruturas de defesa marítima (quebra-mar Norte e molhe Sul) e as atividades portuárias aí desenvolvidas, uma vez que já se realizaram estudos referentes ao quebra-mar Norte. Ao longo do tempo o quebra-mar Norte, tem sido alvo de estudos de galgamento e escoamento interior, através de modelação numérica e ensaios em modelo físico, com principal foco no trecho relativo ao posto A, recorrente em termos de problemas relativos com a sua operacionalidade e segurança, devido aos fenómenos de galgamento aí existentes.

Foi utilizada uma metodologia desenvolvida pelo LNEC (Reis et al, 2011 e Neves et al, 2012) cujo objetivo é avaliar o risco de galgamento de estruturas marítimas, consistindo na determinação das características de agitação marítima frontal às estruturas, ao cálculo do galgamento das mesmas e consequente avaliação do risco associado à ocorrência de galgamentos superiores aos valores admissíveis.

Primeiramente caracterizou-se a agitação marítima registada no porto de Leixões para os parâmetros altura, H , período, T , e direção de onda, θ . Os cálculos foram realizados para um período total de 38 anos (janeiro de 1979 a agosto de 2016), através da utilização dos modelos numéricos WAM, SWAN e DREAMS, com o intuito de caracterizar a agitação marítima ao largo da costa, junto da costa e no interior do porto, respetivamente.

Com base nos resultados do SWAN identificou-se um decréscimo significativo dos valores de altura de onda junto da costa, comparativamente com os resultados obtidos ao largo da mesma. A média da altura significativa de onda foi de 1,64 m com o modelo SWAN e 2,06 m para o modelo WAM, havendo também mudanças significativas na direção de onda, registando-se ondas geradas exclusivamente entre os 180 e 360 graus, com predominância clara de ondas vindas do quadrante noroeste.

Para a caracterização da agitação marítima junto às estruturas do porto recorreu-se ao modelo DREAMS, cujos resultados obtidos são referentes a quinze pontos (D1 a D15) distribuídos ao longo das estruturas marítimas do porto de Leixões. Estes resultados evidenciaram um aumento considerável de altura significativa de onda, comparativamente com os resultados do modelo SWAN, consequência da diminuição dos fundos marítimos desde o largo até à entrada do porto. Os resultados de altura de onda significativa refletem uma diferença notória entre os pontos localizados no quebra-mar Norte e molhe Sul, tendo este parâmetro menor expressão na estrutura referente ao

molhe Sul. Este fato é explicado pela diferença existente no parâmetro direção de onda entre as duas estruturas marítimas, sendo o quebra-mar Norte atingido por ondas geradas nos quadrantes sudoeste e nordeste, e o molhe Sul, quase na totalidade por ondas provenientes de sudoeste (ondas com altura de onda menos expressiva, como evidenciado nos resultados do SWAN).

Posteriormente, determinou-se o caudal de galgamento recorrendo à utilização da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2, com o intuito de avaliar os quinze pontos determinados no modelo DREAMS. Assim, estudaram-se as características estruturais de quatro perfis distintos, relativos à estrutura de proteção exterior do molhe Norte (Perfil 3 – Pontos D1, D2, D3, D4 e D5), ao trecho desde a proteção exterior até à cabeça do quebra-mar Norte (Perfil 2 – Pontos D6, D7 e D8. Perfil 1 – Pontos D9 e D10) e ao molhe Sul (Perfil 3 – Pontos D11, D12 e D13. Perfil 24 – Ponto sD14 e D15). Torna-se importante referir que, por motivos de falta de dados relativos ao perfil da estrutura referente aos pontos D11 a D13, optou-se por se considerar o perfil 3 como o mais indicado para caracterizar a estrutura em questão. Refere-se ainda que a existência do quebra-mar submerso em frente à cabeça do quebra-mar Norte foi desprezada para o presente estudo, uma vez que as suas características não são compatíveis com o modelo neuronal.

No que concerne aos resultados obtidos pela ferramenta NN_OVERTOPPING2, constata-se que os pontos D1 e D2, pertencentes ao quebra-mar Norte, foram os que registaram maiores valores de caudal médio galgado, com valores de ≈ 250 e ≈ 442 l.s⁻¹/m, respetivamente, tendo sido obtidos no mês de dezembro, para alturas de onda significativas de 7,53 e 10,39 metros, para os pontos D1 e D2 respetivamente. Nos pontos D3, D4, D5 e D6 registaram-se caudais de galgamento inferiores aos registados nos pontos D1 e D2. Uma vez que estes pontos partilham o mesmo perfil de estrutura, conclui-se que a diferença de caudal galgado verificada entre os mesmos tem que ver com o ângulo que estas estruturas formam com o Norte. Com efeito, as estruturas cuja normal forma com o Norte um ângulo maior (estruturas relativas aos pontos D1 e D2) apresentam menor capacidade de absorver o impacto das ondas geradas no quadrante noroeste. Ainda no que concerne ao quebra-mar Norte, verificam-se eventos de galgamento no trecho correspondente ao Posto A do Terminal de Petroleiros. Ainda que elevados (caudal máximo de galgamento de 70 e 94 l.s⁻¹/m, para os pontos D8 e D9 respetivamente), são menores que os registados nos pontos D1 e D2, devido à existência de um defletor de onda neste trecho. Relativamente aos pontos D11, D12 e D13, pertencentes ao molhe Sul, não se registaram eventos de galgamento significativos, uma vez que os mesmos estão protegidos da agitação marítima pelo quebra-mar Norte. Ainda no molhe Sul, e referente à estrutura marítima de proteção do Terminal de Cruzeiros, alusivo aos pontos D14 e D15, registaram-se eventos de galgamentos significativos, maioritariamente inferiores a 10 l.s⁻¹/m, principalmente para ondas geradas no quadrante sudoeste (direção de onda entre 180° e 270°). Os resultados desta ferramenta permitiram constatar que os valores máximos de caudal de galgamento correspondem a dois meses de inverno (dezembro e fevereiro), sendo concordante com os estudos de agitação marítima

realizados no local, que comprovam a ocorrência de temporais predominantemente nestes dois meses.

Posto isto, procedeu-se à avaliação do risco de ocorrência de galgamento nas estruturas do porto de Leixões, através do produto entre os graus de probabilidade e de consequência de galgamento. Os resultados obtidos demonstram que os pontos D7, D8 e D9 (pertencentes ao quebra-mar Norte) são os que apresentam grau de risco mais elevado (grau 50), correspondente a risco de galgamento inaceitável, verificando-se excedência dos valores críticos estabelecidos, maioritariamente para os sectores “Veículos” e “Equipamentos”. Os eventos de galgamento obtidos para este trecho do quebra-mar Norte estão em concordância com as condições de inoperacionalidade do Posto A, (inoperável, em média, 80 dias por ano) e de segurança neste posto, sendo imperativo a tomada de medidas de controlo do risco. Relativamente aos pontos D1, D2, D6 (pertencentes ao quebra-mar Norte), D14 e D15 (pertencentes ao molhe Sul), apresentam grau de risco indesejável (grau 20), registando-se excedência dos valores críticos de caudal admissível para o sector “Pessoas”. O ponto D14 é o que apresenta maior probabilidade de ocorrência de galgamentos inadmissíveis para o sector “Pessoas” (superior a 6%). Os resultados de galgamento para os pontos relativos ao molhe Sul são de extrema utilidade para a autoridade portuária, uma vez que representam um risco para as pessoas presentes no Terminal de Cruzeiros, havendo necessidade de adotar medidas razoáveis em termos práticos para diminuir o risco, bem como uma investigação detalhada e plano de monitorização. Para os restantes pontos estudados, determinou-se o grau de risco reduzido (grau 10), que resulta na aceitabilidade do risco nestes pontos desde que se admitiam medidas para o seu controlo. A não excedência dos valores de galgamento admissíveis nestes pontos tem que ver com o afastamento existente entre a estrutura de proteção do molhe norte e o local de realização das atividades do Terminal de Petroleiros (para os pontos D3, D4, D5) e da influência do quebra-mar norte na agitação marítima em frente ao molhe Sul, formando uma zona de acalmia (pontos D11, D12 e D13).

O mapa de risco resultante desta avaliação, permite identificar os locais mais sensíveis do porto de Leixões, identificando-se o trecho do quebra-mar Norte afeto ao Posto A, como o local que apresenta grau de risco mais elevado, sendo perentório proceder-se a medidas de controlo do risco, através da eliminação dos fatores de risco ou diminuição da probabilidade de ocorrência de galgamentos inadmissíveis.

Em suma, o desenvolvimento deste trabalho permitiu compreender a importância da avaliação do risco de galgamento sobre estruturas portuárias, que se mostra ser essencial para a tomada de decisão da autoridade portuária. Os resultados obtidos para a avaliação de risco dependeram fortemente da disponibilidade dos dados relativos ao regime de agitação marítima ao largo da costa e da adequada metodologia de propagação da agitação marítima até ao interior do porto de Leixões. Analogamente, a metodologia utilizada para a avaliação do risco de galgamento, bem como o conhecimento das características físicas das estruturas marítimas, permitiu compreender os riscos

associados aos fenómenos de galgamento atendendo ao tipo de atividade desenvolvida em cada local do porto, constituindo uma ferramenta essencial na gestão de zonas portuárias e costeiras.

7.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como trabalhos futuros no mesmo âmbito da presente dissertação, propõe-se a realização de um levantamento topográfico do perímetro do Porto de Leixões, permitindo maior facilidade e fiabilidade na identificação das características atuais das estruturas marítimas do porto, comparativamente com a identificação das mesmas por intermédio dos perfis de projeto.

Relativamente aos dados de agitação marítima, propõe-se a utilização de um maior número de pontos de transferência do modelo SWAN para o modelo DREAMS, comparando estes resultados com os resultados medidos pela boia ondógrafo de Leixões, de modo a analisar o desempenho deste modelo.

Tendo por base os resultados identificados nesta dissertação, sugere-se ainda a aplicação de outras ferramentas de cálculo de galgamentos, que se mostrem alternativas fiáveis relativamente à ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2. Será igualmente importante a aplicação de diferentes metodologias de avaliação do risco de galgamento, nomeadamente as metodologias multicritério de avaliação de consequências, destacando-se o Analytic Hierarchy Process (AHP) e o Analytic Network Process (ANP), capazes de fornecer uma avaliação de risco mais aprofundada.

Finalmente propõe-se ainda um estudo com enfoque nos efeitos das alterações climáticas no fenómeno de galgamento das estruturas marítimas do Porto de Leixões. Por ser um tema atual e urgente, seria interessante a realização de simulações dos regimes de agitação marítima para cenários futuros, geradas com recurso a modelos de onda forçados por campos de vento provenientes de modelos climáticos, procedendo-se à comparação dos resultados de galgamento entre este cenário e a situação atual.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alises, A., Molina, R., Gómez, R., Pery, P., & Castillo, C. (2014). Overtopping hazards to port activities: Application of a new methodology to risk management (Port Risk Management Tool). *Reliability Engineering & System Safety*, 123, 8-20.
- Antunes, C. (2014). Eventos extremos e a variação do nível do mar. 3ª Jornadas de Engenharia Hidrográfica.
- Bairrão, M. (2014) - Galgamento em estruturas portuárias protegidas por um quebra-mar submerso. 66p., Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- Bairrão, M., da Graça Neves, M., Reis, M. T., & Pinto, F. T. (2016). Galgamento de uma estrutura portuária protegida por um quebra-mar submerso: o caso do Porto de Leixões, Portugal. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 16(2), 121-131.
- Booij, N., Ris, R. C., and Holthuijsen, L. H. (1999), A third generation wave model for coastal regions, Part 1: Model description and validation, *Journal Geophysical Research*, 104, C4, 7649-7666,
- Bravo, A. A. (2012). Comparação de duas ferramentas de cálculo do galgamento baseadas na análise de redes neuronais. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Brito, S. (2007). Estudo do galgamento em estruturas marítimas. Dissertação de Mestrado: Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa.
- Castro, J. N. N. M. (2015). Análise técnico-económica de soluções de reforço de estruturas portuárias. Estudo do caso: Porto de Leixões. Tese de Mestrado de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Coelho, C. (2005). Riscos de Exposição Ambiental de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira. Dissertação de Doutoramento, Secção Autónoma de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Coeveld, E. M., Van Gent, M. R. A., & Pozueta, B. (2005). Neural network manual: NN_OVERTOPPING 2. CLASH: WP8, WL/Delft Hydraulica, Delft.
- Chhetri, P., Corcoran, J., Gekara, V., Maddox, C., & McEvoy, D. (2015). Seaport resilience to climate change: mapping vulnerability to sea-level rise. *Journal of Spatial Science*, 60(1), 65-78.
- do Carmo, J. S. A. (2016), Processos físicos e modelos computacionais em engenharia costeira, Imprensa da Universidade de Coimbra/Coimbra University Press.
- Fabião, J. P. F. (2012). Estabilidade hidráulica do manto de quebra-mares de talude; estudo em modelo físico. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Ferreira, J. C. R. (2016). Ordenamento Ambiental de Frentes Urbanas Litorais em Áreas Baixas de Elevado Risco e Vulnerabilidade ao Galgamento Costeiro. As Infraestruturas Verdes como Estratégia de Resiliência para as Comunidades Costeiras. (Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Portugal).
- Flatter, D. (1998), XTide Manual: Harmonic tide clock and tide predictor, E,U,A.

- Fortes, C, J, (2002), Transformações não-lineares de ondas marítimas em zonas portuárias (Análise pelo Método dos Elementos Finitos), Dissertação de Doutoramento em Eng, Mecânica: Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa.
- Fortes, C, J, E, M., Reis, M, T., Poseiro, P., Rosa-Santos, J, A., Garcia, T., Capitão, R., Lopes, P, (2015), Ferramenta de apoio à gestão costeira e portuária: o sistema Hidralerta, Em Atas do VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Aveiro, Portugal.
- Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., Poseiro, P., Capitão, R., Rosa-Santos, J. A., Pinheiro, L. P., Azevedo, E. B. (2014). HIDRALERTA Project - A Flood Forecast And Alert System In Coastal And Port Areas. Proc. Iwa World Water Congress and Exhibition: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.
- Gomes, F. Veloso; Pinto, F. Taveira; Dias, E. Brogueira; Lopes, H.G. (2009) - Two-dimensional physical modeling of the northern breakwater of Leixões harbor, Portugal: Case study. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Janssen, P. A., Bauer, E., Komen, G. J., Bertotti, L., Greenwood, J. A. (1988). The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. Journal of Physical Oceanography 18, 1775–1810.
- Hosseini S., Barker K. Modeling infrastructure resilience using Bayesian networks: A case study of inland waterway ports. Computers & Industrial Engineering 2016; 93, 252–266.
- IPCC (2000) IPCC Special Report, Emissions Scenarios: Summary for Policymakers. Retirado de: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>.
- Lourenço, I, F, (2016), Avaliação do risco de galgamento sobre estruturas portuárias, Caso de estudo da Praia da Vitória, Açores, Área Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Neves, D, R, (2009), Utilização de um sistema de informação geográfica na modelação numérica de propagação de ondas em zonas portuárias, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa,
- Neves, D, R., Rosa-Santos, J, A., Reis, M, T., Fortes, C, J., Simões, A., Azevedo, E, B., & Rodrigues, M, D, C, (2012), Metodologia de avaliação do risco associado ao galgamento de estruturas marítimas: Aplicação ao porto e à baía da Praia da Vitória, Açores, Portugal, Revista de Gestão Costeira Integrada, 12(3), 291-312.
- Neves, D. R. C. B., Reis, M. T.; Fortes, C. J. E. M.; Rosa-Santos, J. A. (2012a). Avaliação do risco de galgamento do posto 2 do molhe oeste do porto de Sines, in 11º Congresso da água (CD-ROM), APRH; Porto.
- Neves, P., Poseiro, P., Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., Capitão, R., Antunes do Carmo, J. S., Raposo, P., Ferreira, J. C. (2013). Aplicação da metodologia de avaliação do risco de inundação/galgamento na praia de São João da Caparica, in 8.as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/PIANC, Lisboa.
- NP ISO 31000:2013. (2013). Gestão do risco. Princípios e linhas de orientação.
- Patrício, T. M. (2012). Modelação numérica do galgamento de quebra-mares de talude. Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa. Ms.C Thesis
- Pereira, D, M, F, (2013), Avaliação do risco de galgamento de estruturas portuárias: o caso do Porto de Ponta Delgada (Açores, Portugal), Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil: Universidade da Madeira, Funchal,

- Pereira, D. M. F., Lopes, L. G., Reis, M. T., Fortes, C. J. E. M., & Poseiro, P. (2014), Avaliação do risco de galgamento de estruturas portuárias: aplicação ao porto de Ponta Delgada, Proc. 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, IH, Lisboa, Portugal, 24,
- Pimenta, J. (2011), Dimensionamento Probabilístico de Quebra-mares de Taludes, Aplicação ao quebra-mar Norte do Porto de Leixões, Dissertação de mestrado em Eng. Civil: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto (FEUP), Porto.
- Pinheiro, L., Rosa-Santos, J., Fortes, C., & Capitão, R. (2007). SOPRO - Pacote integrado de modelos para avaliação dos efeitos das ondas em portos. Revista da Tecnologia da Água.
- Poseiro, P., Rosa-Santos, J. A., Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., Craveiro, J. (2013). Aplicação do processo de análise hierárquica (AHP) à análise das consequências de ocorrência de galgamentos. O caso da baía da Praia da Vitória, in 8.as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/ PIANC, Lisboa.
- PULLEN, T.; ALLSOP, N. W. H.; BRUCE, T.; KORTENHAUS, A.; SCHUTTRUMPF, H. e VAN DER MEER, J. W. - EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. Environment Agency, UK, Expertise Network Waterkieren, NL, and Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, DE, 2007.
- Raposeiro, P. D., Fortes, C. J. E. M., Capitão, R., Reis, M. T., Ferreira, J. C., Pereira, M. T., Guerreiro, J. (2013). Preliminary phases of the Hidralerta System: Assessment of the flood levels at S. João da Caparica beach, Portugal. Journal of Coastal Research, SI 64, 1896-1900.
- Reis, M. T., Fortes, C. J. E. M., Neves, D. R. C. B., Rodrigues, S., Rosa-Santos, J. A., Vieira, A. S., Simões, A., Azevedo, E. B. (2011). Previsão dos galgamentos na baía da Praia da Vitória para avaliação de risco e alerta, in VI Congresso sobre Planeamento e Gestão de Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Ilha da Boa Vista, Cabo Verde.
- Repetto, M. P., Burlando, M., Solari, G., De Gaetano, P., & Pizzo, M. (2017). Integrated tools for improving the resilience of seaports under extreme wind events. Sustainable Cities and Society, 32, 277-294.
- Rodrigues, J. R. (2014), Avaliação do risco e aplicação do processo de análise hierárquica (AHP) na avaliação das consequências de galgamento em zonas costeiras e portuárias-Aplicação ao porto de Ponta Delgada, Açores. Dissertação de mestrado em Eng. Civil: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto (FEUP), Porto.
- Rodrigues, J. R., Poseiro, P., Rosa-Santos, J. A., Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., Pinto, F.T., (2014), Avaliação do risco de galgamento: O porto de Ponta Delgada. 9as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto.
- Rosa Rosa-Santos, P. (2010). Análise da Interacção de Navios com Dispositivos de Acostagem e Amarração. Estudo em Modelo Físico do Posto "A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões (Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal).
- Rosa-Santos, J.A., Guilherme, L., Fortes, C.J.E.M., Palha, A., Simões, A., (2008) - Metodologia para a previsão da agitação marítima implementada no pacote MOIA, In XI Jornadas Técnicas Engenharia NavalCENTEC, 25 a 27 de Novembro, Lisboa,
- Rosa-Santos, J. A., Reis, M. T., Neves, D., Fortes, C. J. E. M., Rodrigues, S., Azevedo, E., Rodrigues, M., Simões A., Ramalheira, J., Raposeiro, P. (2011). Aplicação de uma metodologia para avaliação do risco para a navegação e galgamentos no porto de Praia da Vitória, in 7.as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/ PIANC, Porto. Silva, D. M. F. (2012).

Teixeira, R., A., (2012) – Quebra-mares portugueses, Inventário e análise comparativa de soluções, Dissertação de mestrado em Eng, Civil: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto (FEUP), Porto.

VERA-CRUZ, Daniel. CARVALHO, José Reis. Maciço Submerso de Pré-Rebentação das Ondas como meio de Protecção de Obras Marítimas – O Caso do Quebra-Mar de Leixões. 1993, LNEC.

ANEXOS

Anexo A Execução do modelo SWAN

A execução do modelo SWAN foi realizada através de uma interface gráfica em Microsoft Access, desenvolvida por Pinheiro et al. (2007), que englobou os seguintes procedimentos:

- ✚ Executar o ficheiro de Microsoft Access (.mdb).
- ✚ Abrir o formulário “ABRE_PROJ2” e seleccionar o projecto “LIEXÕES”).

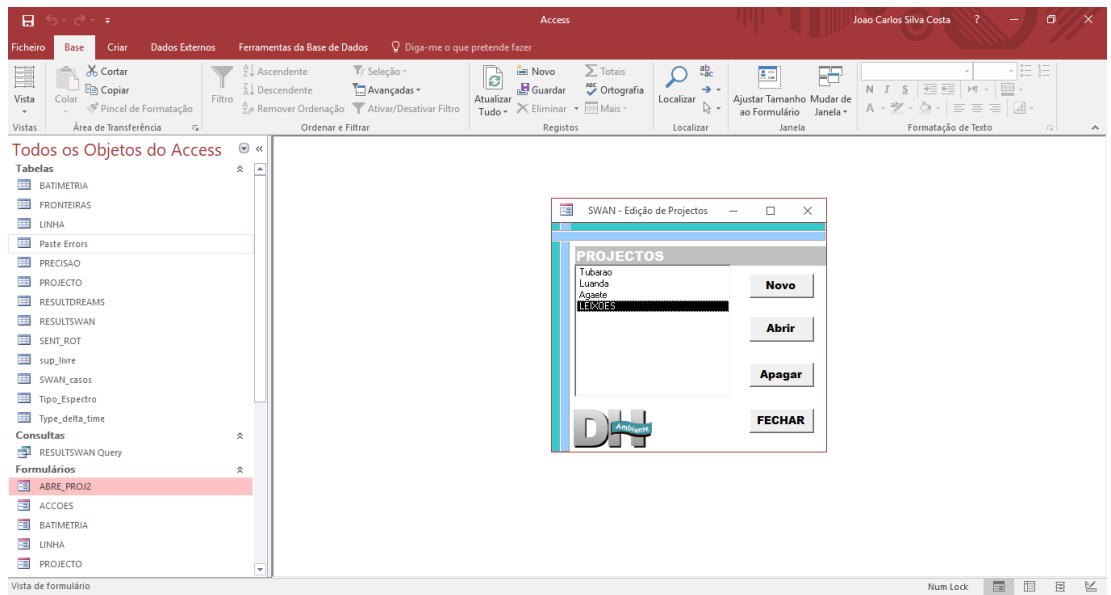


Figura A.1 - Procedimento de seleção do projeto.

- ✚ Abrir o separador “Computacional Grid” para criar as malhas a utilizar, inserindo as opções “yes” e “no” para “Nested Grid” e “Nested Grid_1” respectivamente. As características das malhas a utilizar são criadas através da inserção dos valores de comprimento em x e y, e do espaçamento entre os pontos, DX e DY (figura 0.1).

Non Stationary Conditions		Currents Conditions		Output Specifications	
Project Identification	Computational Grid	Bathymetry Grid	Spectrum Resolution	Physical Processes	Stationary Wave Conditions
Nested grid <input checked="" type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no Nested grid_1 <input type="checkbox"/> yes <input checked="" type="checkbox"/> no					
		Main Grid	Nested Grid	Nested Grid_1	
X inicial		160000	-90000	0	
Y inicial		117000	134000	0	
Grid rotation		0	0	0	
Grid length in x direction (m)		119000	49000	0	
Grid height in y direction(m)		90000	66000	0	
DX		2000	200	0	
DY		2000	200	0	
DX for data transference		200	0		
DY for data transference		200	0		

Figura 0.1 - Caracterização das malhas a utilizar.

- ✚ Abrir o separador “Bathymetry Grid” e indicar qual o ficheiro de batimetria a utilizar.
- ✚ Abrir o separador “Spectrum Resolution” e seleccionar a opção “Circle”, de modo a que as direções espectrais se verifiquem em 360°, divididos por 24 intervalos. De seguida insere-se a resolução de frequência com valores de 0,04 0,5 e 25, para os campos de frequência mínima, frequência máxima e intervalo de frequência, respetivamente.
- ✚ Abrir o separador “Stacionary Wave Conditions” onde é inserido o ficheiro representativo das condições de agitação das ondas ao largo, fornecidas pelo modelo WAM com a estrutura indicada na (figura 0.2).

ECMWF_Leixões_1979_1983.prn - Bloco de notas											
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda											
Date	h	m	hs	(m)	(m)	dir	(d.N)	T	dir	nm	
			s			(s)		(deg)	(s)	(d.N)	
19790101	1	0	0	4.61	10	10	281	10	11.9	281	1.5
19790101	6	0	0	4.21	10	10	284	10	12.4	284	3.66
19790101	12	0	0	3.8	10	10	285	10	12.5	285	1.11
19790101	18	0	0	3.39	10	10	285	10	12.3	285	3.6
19790102	1	0	0	3.03	10	10	284	10	12	284	1.18
19790102	6	0	0	2.72	10	10	283	10	11.6	283	3.87
19790102	12	0	0	2.45	10	10	281	10	11.2	281	0.97
19790102	18	0	0	2.2	10	10	281	10	10.8	281	3.61
19790103	1	0	0	2.14	10	10	270	10	9.3	270	1.16
19790103	6	0	0	2.79	10	10	232	10	7.3	232	3.77
19790103	12	0	0	3.38	10	10	242	10	7.7	242	1.16
19790103	18	0	0	3.77	10	10	263	10	8.4	263	3.34
19790104	1	0	0	4.04	10	10	279	10	9.1	279	1.44
19790104	6	0	0	4.05	10	10	290	10	9.6	290	3.37
19790104	12	0	0	3.84	10	10	299	10	10.2	299	1.58
19790104	18	0	0	3.56	10	10	307	10	10.7	307	2.87
19790105	1	0	0	3.3	10	10	313	10	10.9	313	1.88

Figura 0.2 - Exemplo de ficheiro representativo das condições de agitação marítima de 1979 a 1983, provenientes do modelo WAM.

- ✚ Abrir o separador "Output Specifications" para definir o nome dos ficheiros que serão gerados pelo SWAN.
- ✚ Abrir o separador "Results", para especificar a directoria de exportação dos dados, e o método de interpolação ("Kriging").
- ✚ No mesmo separador, seleccionar o botão "Create Data Files", originando ficheiros "INPUT_swn" e o ficheiro de comandos "SWAN.BAT", utilizado para correr o modelo SWAN.
- ✚ Após correr o modelo, são criados ficheiros "TRANSFER.dat" representativos dos resultados do modelo SWAN para as condições inseridas. Estes ficheiros contêm a informação relativa às condições de agitação previstas para os pontos a analisar, os dados de input do modelo WAM e o nível de maré (figura 0.3).

TRANSFER_P1nested1_com0.dat - Bloco de notas											
Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda							
0	6	180	4	0.	6.2308	204	4.3824	213.372	4.7845	4.3824	
0	6	190	4	0	6.2308	204	4.4162	217.719	4.8209	4.4162	
0	6	200	4	0	6.2308	208	4.4577	221.981	4.8569	4.4577	
0	6	210	4	0	6.2308	216	4.4926	227.426	4.8833	4.4926	
0	6	220	4	0	6.2308	220	4.4963	232.726	4.8969	4.4963	
0	6	230	4	0	6.2308	232	4.5121	238.959	4.9142	4.5121	
0	6	240	4	0	6.2308	240	4.5318	245.872	4.9313	4.5318	
0	6	250	4	0	6.2308	252	4.5474	253.509	4.9468	4.5474	
0	6	260	4	0	6.2308	260	4.5646	261.856	4.961	4.5646	
0	6	270	4	0	6.2308	272	4.5768	270.792	4.9721	4.5768	
0	6	280	4	0	6.2308	280	4.5849	280.103	4.9785	4.5849	
0	6	290	4	0	6.2308	288	4.5832	289.342	4.9786	4.5832	

Figura 0.3 - Exemplo do ficheiro "TRANSFER.dat" gerado pelo modelo SWAN

Com recurso ao modelo SWAN e através dos procedimentos referidos, foram obtidos os valores de altura significativa da onda (H_s), períodos médio (T_m) e de pico (T_p), direcções média (θ_m) e de pico (θ_p), correspondentes às características de agitação marítima ao longo do período de 1979 a 2016.

Anexo B Resultados do modelo SWAN

Gráficos comparativos dos parâmetros H_s , e T_p para o período de 1979 a 2016, entre os modelos WAM e SWAN.

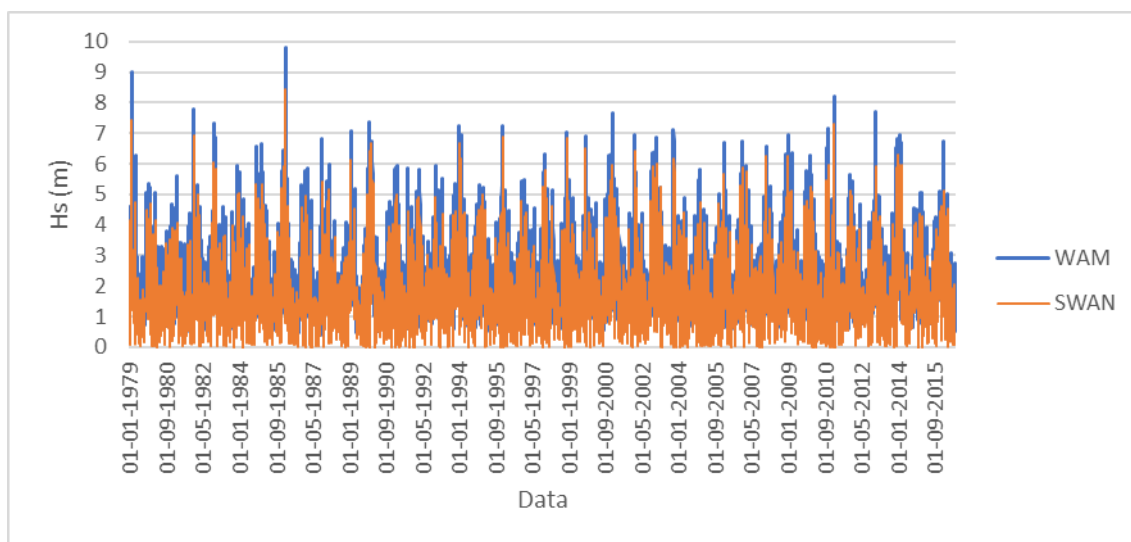


Figura 0.4 - Comparação entre os dados de altura significativa fornecidos pelo WAM, e os obtidos através do SWAN.

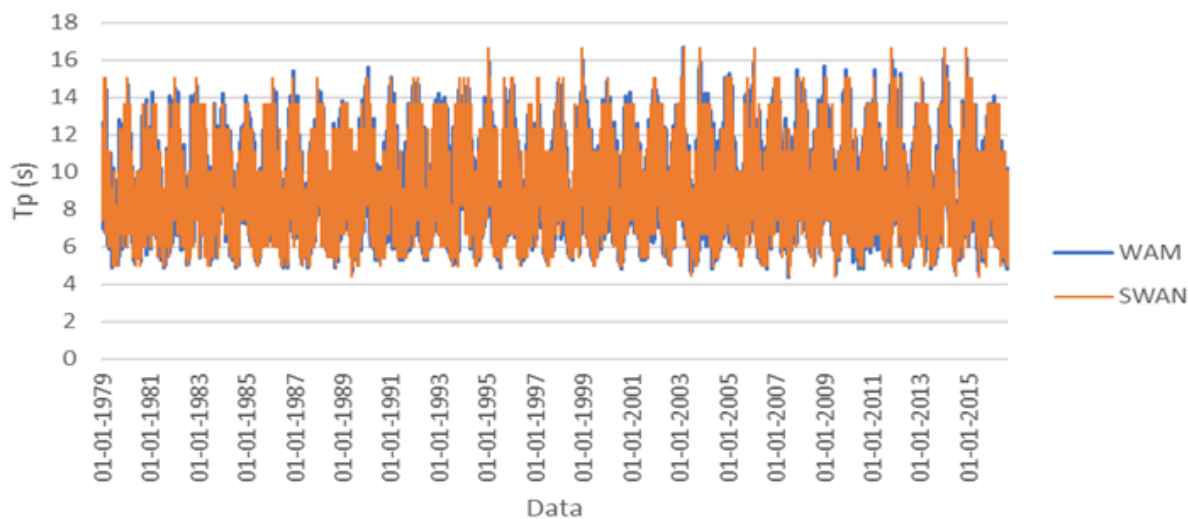


Figura 0.5 - Comparação entre os dados de período de pico de onda fornecidos pelo WAM, e os obtidos através do SWAN.

Gráficos comparativos entre os parâmetros H_s , T_m e Dir no ponto P14, no período de 1979 e 2016.

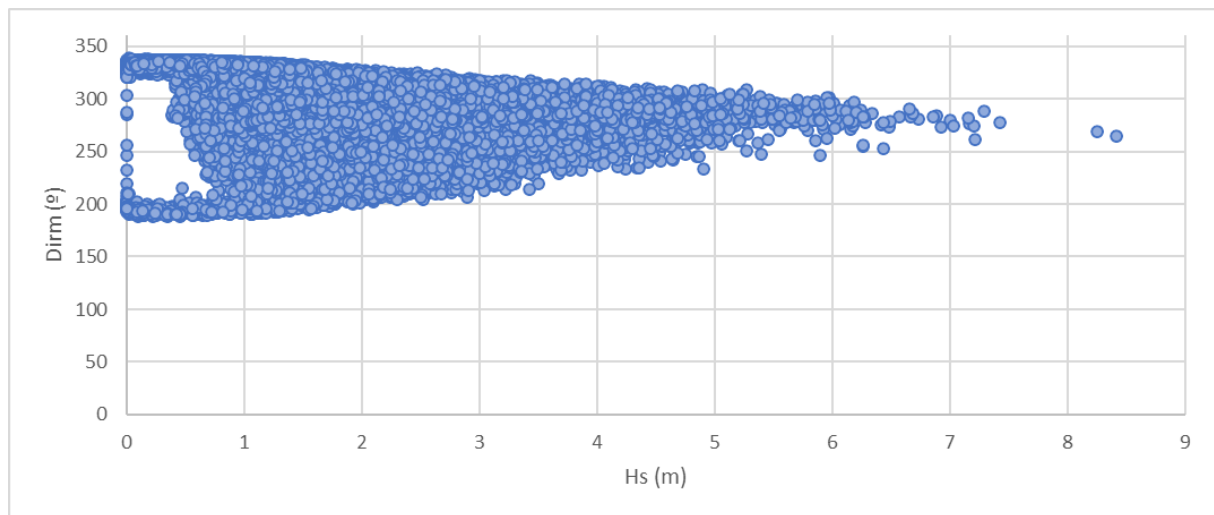


Figura 0.6 - Relação entre os valores de Hs e DIR no ponto P14 obtidos pelo modelo SWAN.

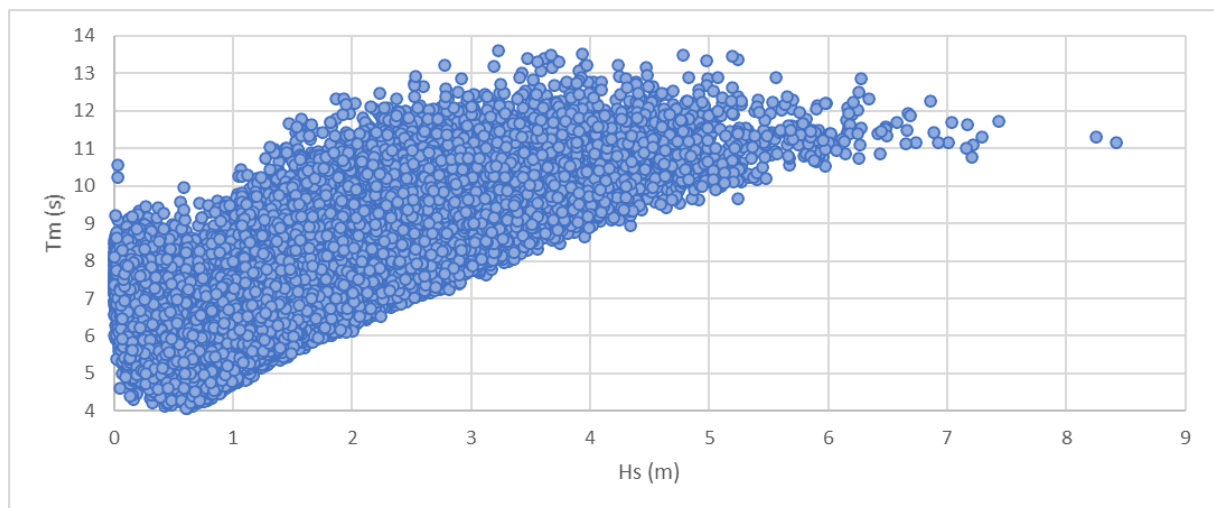


Figura 0.7 - Relação entre os valores de Hs e Tm no ponto P14 obtidos pelo modelo SWAN.

Anexo C Execução do modelo DREAMS

Para o procedimento de execução do modelo DREAMS, recorreu-se a uma interface gráfica desenvolvida por Pinheiro et al. (2007), tal como sucedido com o modelo SWAN. Assim, para correr este modelo, concretizaram-se os seguintes procedimentos:

- ✚ Executar o ficheiro Microsoft Access do modelo DREAMS (“DREAMS.mdb”).
- ✚ Abrir o formulário “ABRE_PROJ2” e seleccionar o projeto “LIEXÕES” (figura 0.8).

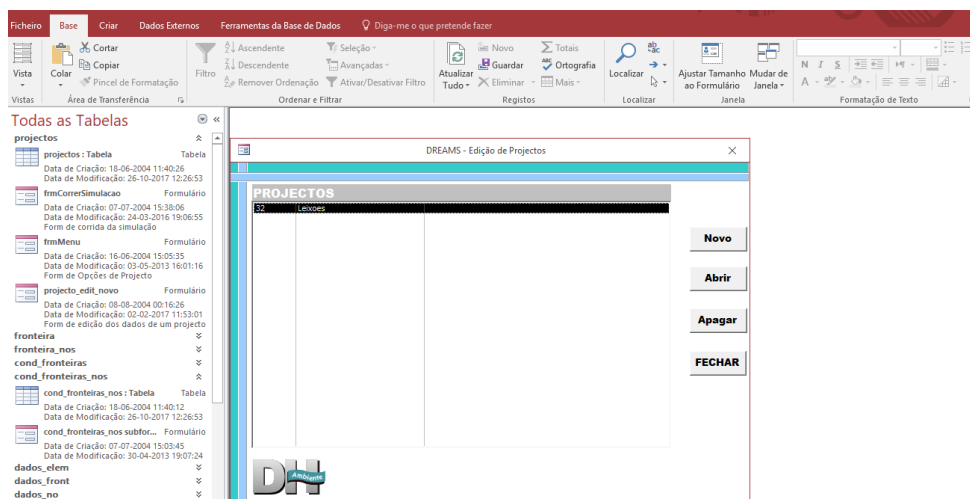


Figura 0.8 – Procedimento de seleção do projeto.

- ✚ Abrir a opção “Edição de Dados”, que abrirá automaticamente o separador “File Names” (figura 0.9).

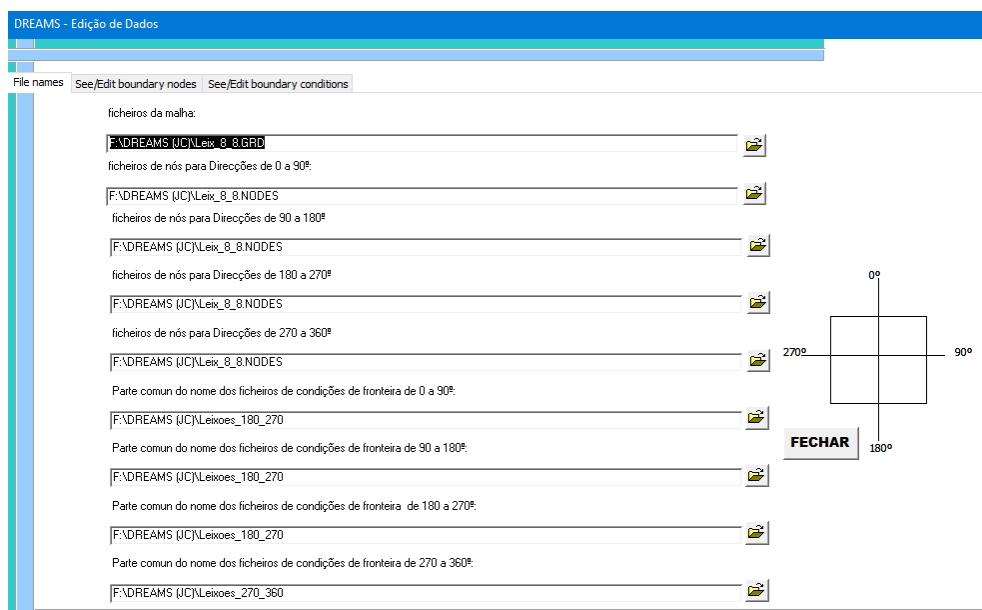


Figura 0.9 - Separador "File Names" contendo as directorias dos ficheiros representativos das condições de fronteira.

Neste separador, inserem-se as condições de fronteira do caso de estudo, caracterizadas pelos ficheiros "COND_dad." e "NODES_dad." (figura 0.10). Estes ficheiros fornecem a informação relativa aos troços constituintes do perímetro de análise em torno, neste caso, do porto de Leixões.

COND_4.00_270.00_3.50.dad - Bloco de notas					NODES_4.00_300.00_3.00.dad - Bloco de notas				
Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda	Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda
6					local.nodes				
1					1				
237512					4110			1	
221520					237512				
1					237513				
5					237661				
1					237662				
221183					237811				
119703					237812				
1					237955				
4					238084				
1					238213				
119295					238336				
11215					238454				
1					238572				
4					238690				
1					238806				
11216					238919				
36024					239032				
0.5					239141				
5					239248				
1					239346				
36743					239442				
184592					239535				
0.5					239625				
5					239712				
1					239796				

Figura 0.10 - Exemplo de ficheiros "CON_dad." e "NODES_dad." utilizados.

- ✚ Abrir a opção “Correr Simulação” e executar o modelo, inserindo as condições dos parâmetros a considerar, nomeadamente o intervalo entre cada parâmetro, assim como os valores mínimos e máximos respetivos. Uma vez que o processo de geração das condições de agitação marítima por parte deste modelo é um processo moroso, procedeu-se a várias corridas do mesmo recorrendo a quatro computadores distintos.
- ✚ Posteriormente à conclusão das corridas do modelo, e ainda na opção “Correr Simulação”, abrir o separador “Resultados” e inserir a diretoria de localização do ficheiro que contem a informação sobre os pontos a analisar (dados_pontos.dad). Este ficheiro deverá conter a informação relativa ao número de pontos a considerar (1ª linha), o comprimento do retângulo de extração dos resultados em x (2ª linha) e y (3ª linha), e as coordenadas dos pontos de extração (linhas restantes), de acordo com a figura 0.11.

dados_pontos.dad - Bloco de notas		—	□	×
Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda
44				
10				
10				
687.4299636	734.1667354			
1330.319163	753.2624542			
1521.276351	1046.063476			
1393.971559	1256.116382			
1597.659226	1370.690695			
1298.492965	1504.360727			
1495.815393	1606.20456			
1209.379611	1663.491717			
1381.24108	1746.239832			
1253.936288	1937.19702			
1171.188173	2077.232291			
1082.074819	2198.171843			
1094.805298	2325.476635			
1196.649132	2459.146667			
1311.223444	2580.086219			
1419.432518	2643.738615			
1508.545872	2567.35574			
1572.198268	2471.877146			
1540.37207	2713.756251			

Figura 0.11 - Exemplo de ficheiro "dados_pontos.dad" utilizado.

- ✚ Clicar na opção “Extrair Pontos”, originando duas matrizes para cada ponto do SWAN, relativas à direção (“TETA_MEDIA.dad”), e ao parâmetro que relaciona a altura de onda num determinado ponto com a altura de onda à entrada do domínio de cálculo, através do quociente entre as duas variáveis (“HHU_MEDIA.dad”) (figura 0.12).

HHU_MEDIA_4.00_180.00_1.00.dad - Bloco de notas								
Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda				
687.4300		734.1667	0.8902	179.2432	0.0914	0.2486	0.8288	
1330.3192		753.2625	0.8022	172.3004	-0.0529	0.0413	0.8193	
1521.2764		1046.0635	1.4367	179.4374	0.0193	-0.1453	1.1976	
1393.9716		1256.1164	0.7683	182.6073	0.0212	0.3569	0.8225	
1597.6592		1370.6907	1.2699	185.5557	0.0837	0.0543	1.2237	
1298.4930		1504.3607	0.7704	166.4002	0.1114	-0.3807	0.8784	
1495.8154		1606.2046	1.1524	179.3888	0.0763	-0.2845	1.1494	
1209.3796		1663.4917	0.4610	137.7053	0.1121	-0.0269	0.3958	
1381.2411		1746.2398	1.0083	188.4471	-0.0707	0.3170	0.9610	
1253.9363		1937.1970	0.3470	156.2287	0.0421	-0.0787	0.4018	
1171.1882		2077.2323	0.1859	149.7188	-0.0360	0.0593	0.1620	
1082.0748		2198.1718	0.1193	123.4502	0.0190	0.0232	0.1250	
1094.8053		2325.4766	0.2472	136.3794	0.0367	-0.0892	0.2532	
1196.6491		2459.1467	0.2945	149.7026	0.0263	-0.1195	0.2754	
1311.2234		2580.0862	0.6453	173.2740	-0.0187	-0.0200	0.6896	

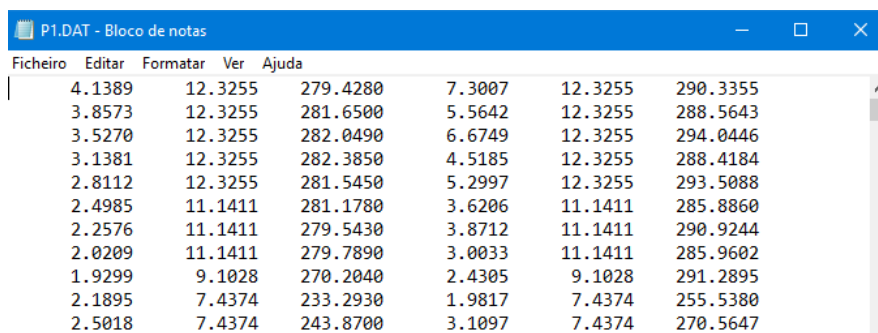
Figura 0.12 - Exemplo de matriz H/H0 para os pontos com condições $T_p=4$, $\theta=180^\circ$ e $NM=1$.

- Seguidamente, escolher a opção “Obter Matriz Transferência”, para gerar ficheiros para cada ponto “TRANSFER_P.cvs” (figura 0.13).

TRANSFER_P1 - Bloco de notas								
Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda				
8								
8								
7								
0.5	4	180	0.4213	4	254.759	0.0936	0.0212	0.6737
0.5	4	210	0.1221	4	272.545	0.0039	0.0039	0.179
0.5	4	240	0.8505	4	175.148	0.0868	0.0182	1.4162
0.5	4	270	1.3173	4	255.178	0.1694	0.0652	2.1708
0.5	4	300	1.0665	4	304.723	-0.1277	0.099	1.3823
0.5	4	330	0.4952	4	211.274	-0.0547	-0.0012	0.7989
0.5	4	360	0.1042	4	223.102	0.018	-0.0323	0.1516
0.5	6	180	0.6938	6	253.534	0.4405	0.1499	0.9373
0.5	6	210	0.5535	6	268.485	-0.2741	-0.1124	0.8848
0.5	6	240	1.1774	6	270.863	0.0407	0.1057	1.8823

Figura 0.13 - Exemplo de ficheiro relativo à matriz de transferência do ponto P1.

Correr o ficheiro Batch relativo a cada uma das matrizes de transferência, dando origem aos resultados do modelo DREAMS para cada ponto de análise (figura 0.14), identificando os valores dos parâmetros H_s , T_p e Dir nas três últimas colunas.



Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda		
4.1389	12.3255	279.4280	7.3007	12.3255	290.3355	
3.8573	12.3255	281.6500	5.5642	12.3255	288.5643	
3.5270	12.3255	282.0490	6.6749	12.3255	294.0446	
3.1381	12.3255	282.3850	4.5185	12.3255	288.4184	
2.8112	12.3255	281.5450	5.2997	12.3255	293.5088	
2.4985	11.1411	281.1780	3.6206	11.1411	285.8860	
2.2576	11.1411	279.5430	3.8712	11.1411	290.9244	
2.0209	11.1411	279.7890	3.0033	11.1411	285.9602	
1.9299	9.1028	270.2040	2.4305	9.1028	291.2895	
2.1895	7.4374	233.2930	1.9817	7.4374	255.5380	
2.5018	7.4374	243.8700	3.1097	7.4374	270.5647	

Figura 0.14 - Exemplo de ficheiro de resultados DREAMS, relativo ao ponto P1.

Anexo D Resultados do modelo DREAMS

Gráficos representativos da Altura de onda significativa, H_s , para os 15 pontos estudados, desde 1979 a 2016.

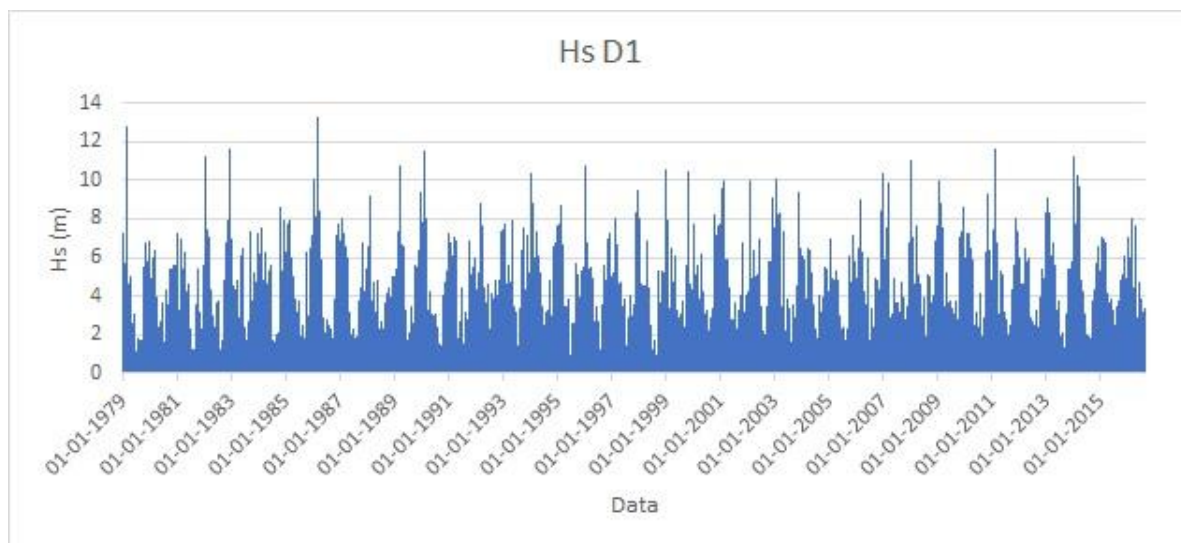


Figura 0.15 - Série temporal de Altura significativa (H_s) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS.

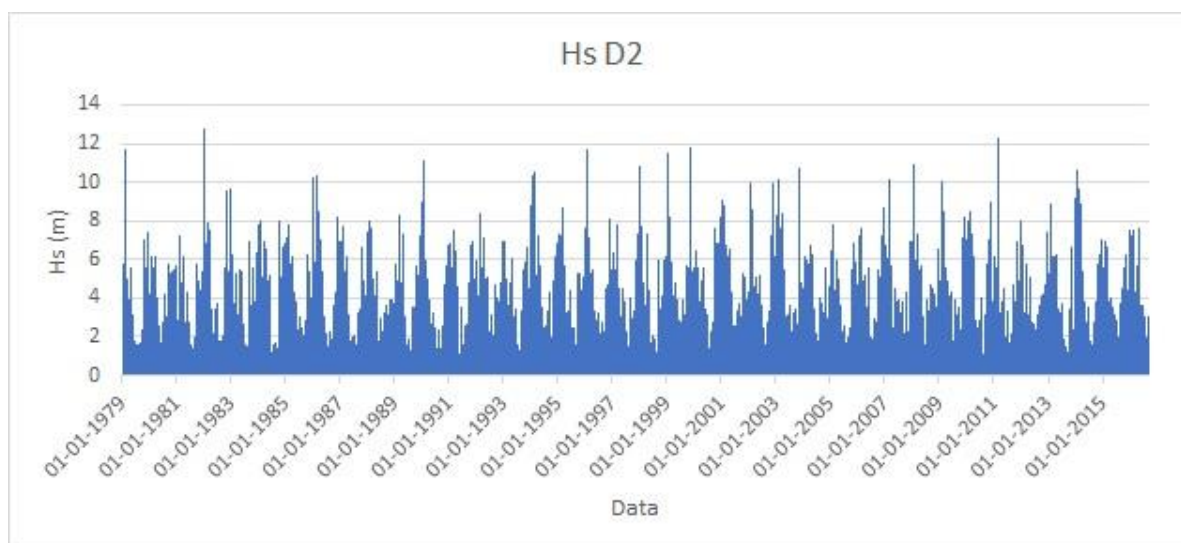


Figura 0.16 - Série temporal de Altura significativa (H_s) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS.

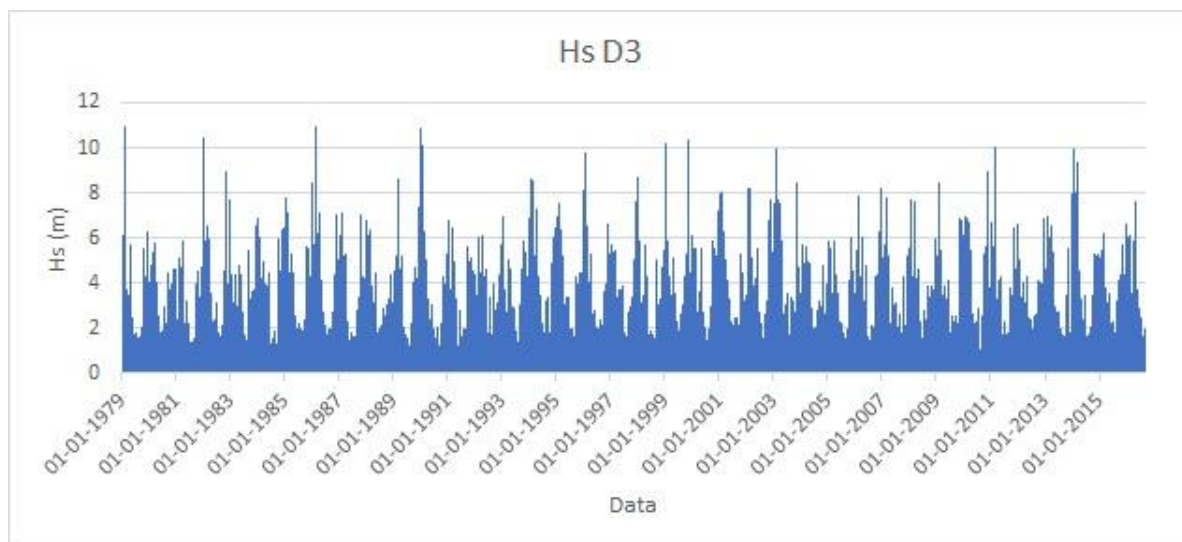


Figura 0.17 - Série temporal de Altura significativa (Hs) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS.

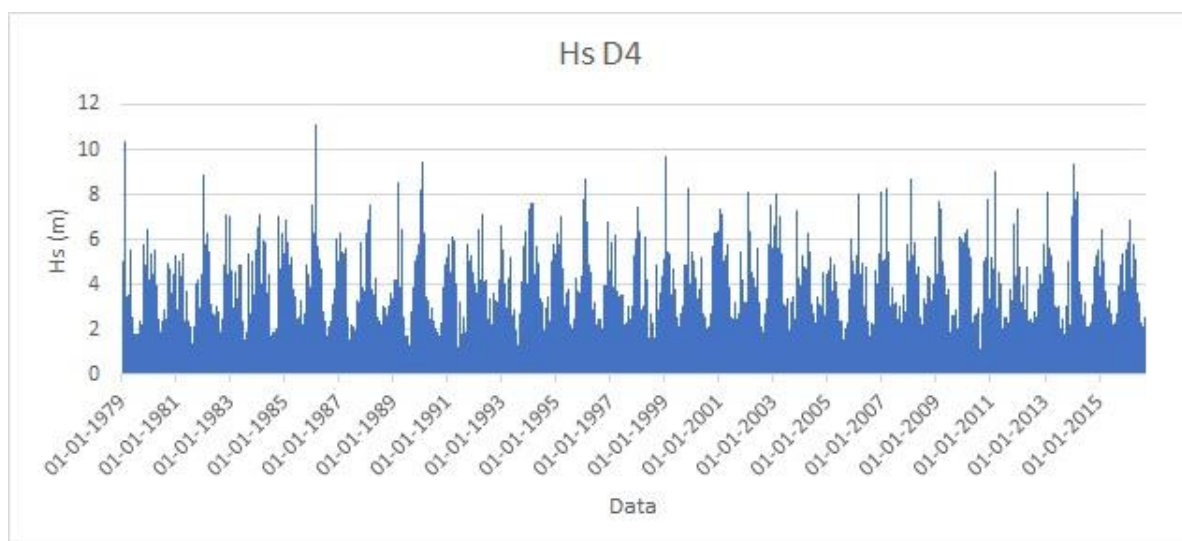


Figura 0.18 - Série temporal de Altura significativa (Hs) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS.

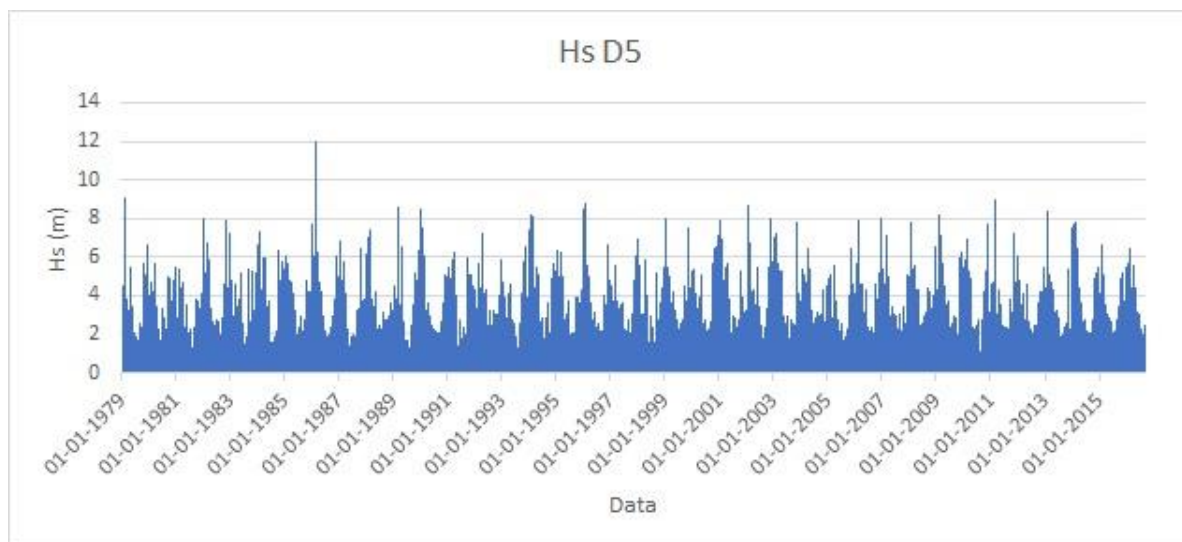


Figura 0.19 - Série temporal de Altura significativa (Hs) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS.

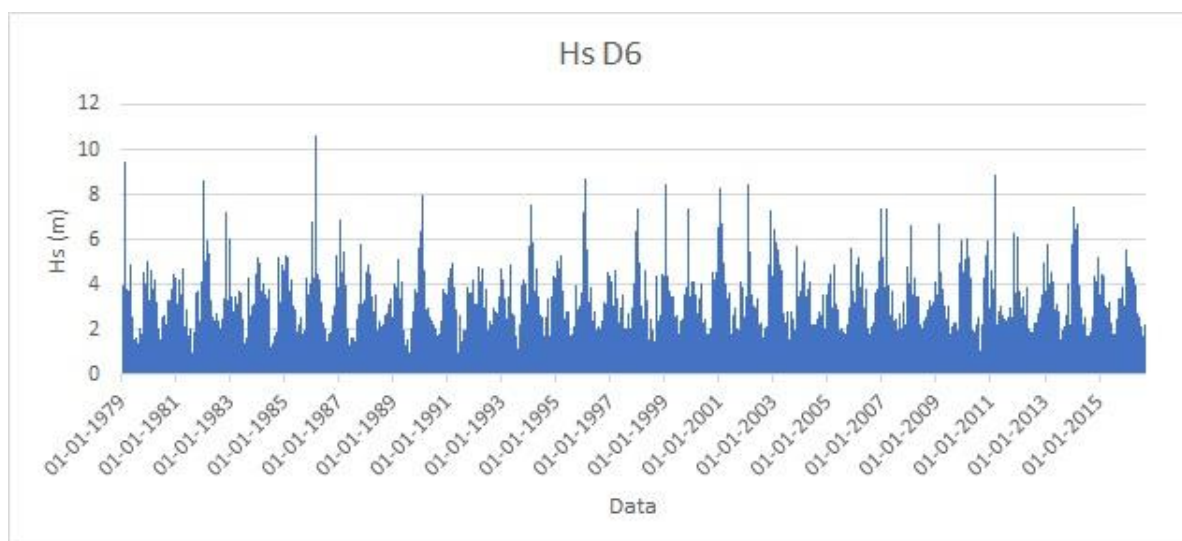


Figura 0.20 - Série temporal de Altura significativa (Hs) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS.

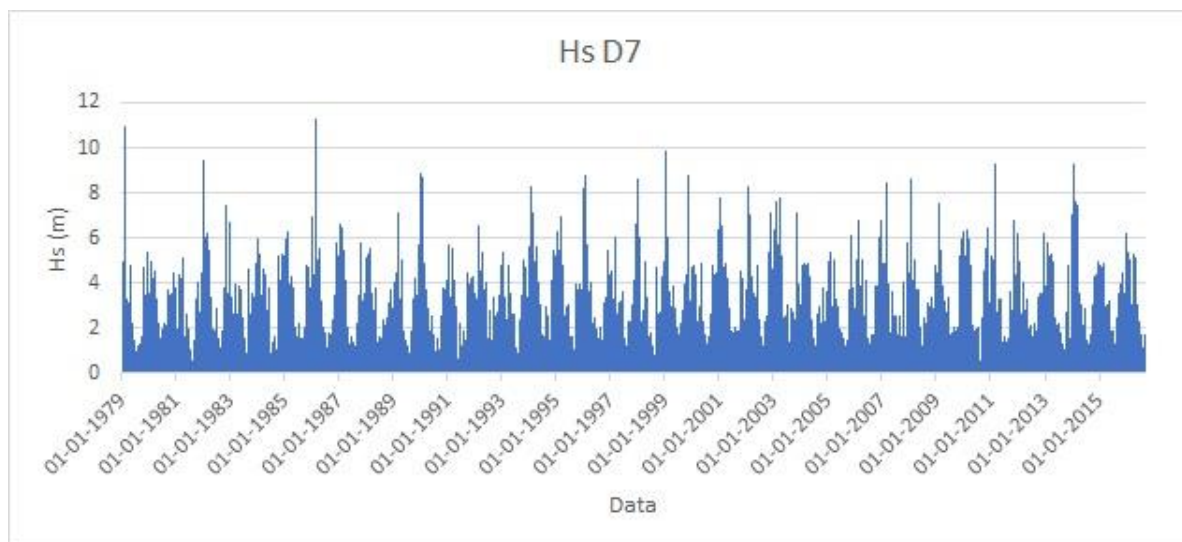


Figura 0.21 - Série temporal de Altura significativa (Hs) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS

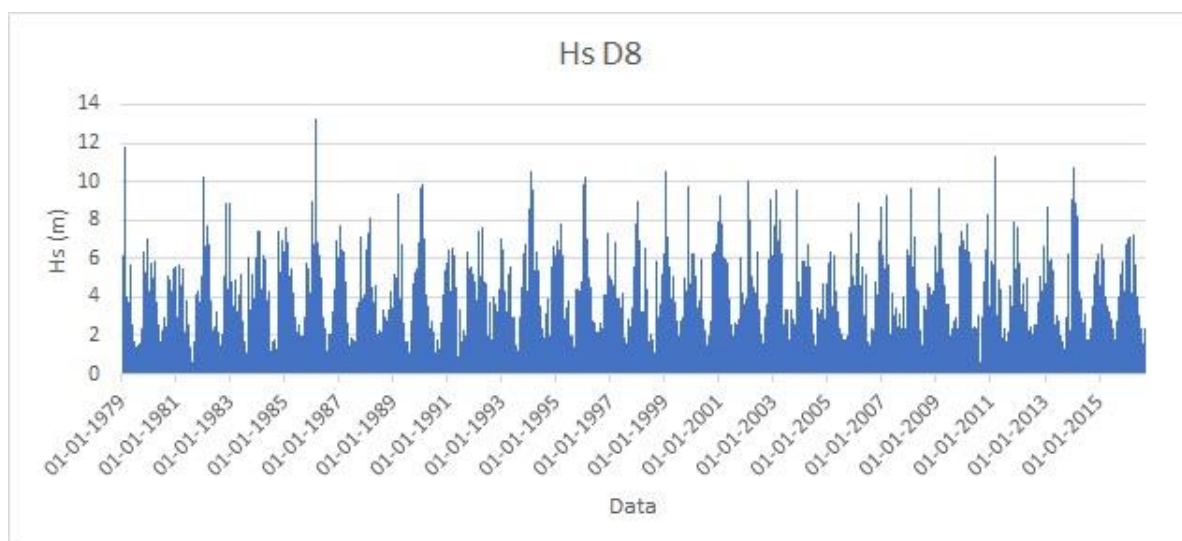


Figura 0.22 - Série temporal de Altura significativa (Hs) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS

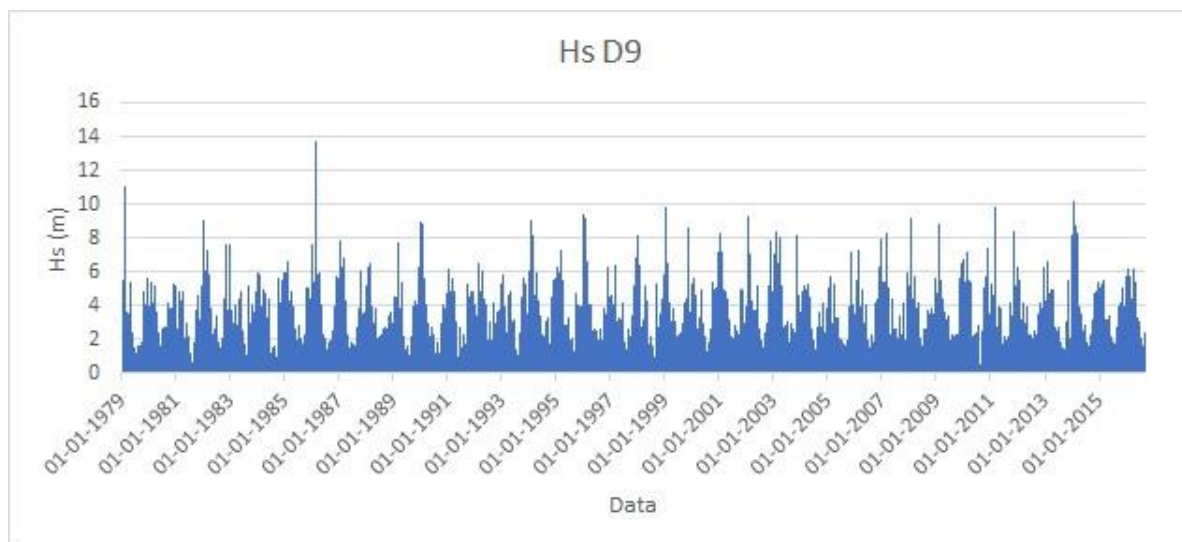


Figura 0.23 - Série temporal de Altura significativa (Hs) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS

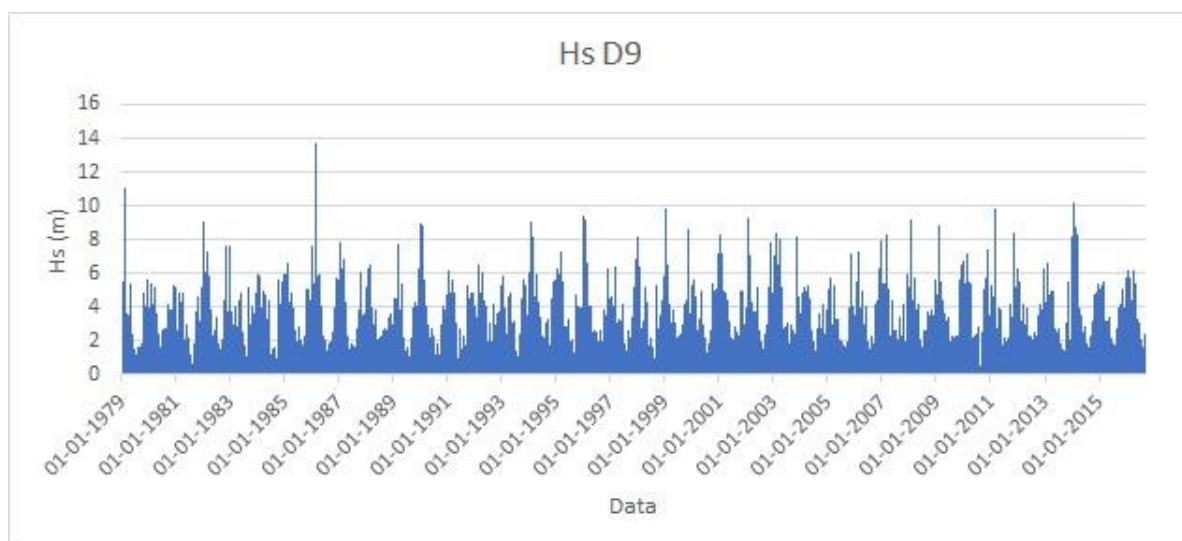


Figura 0.24 - Série temporal de Altura significativa (Hs) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS

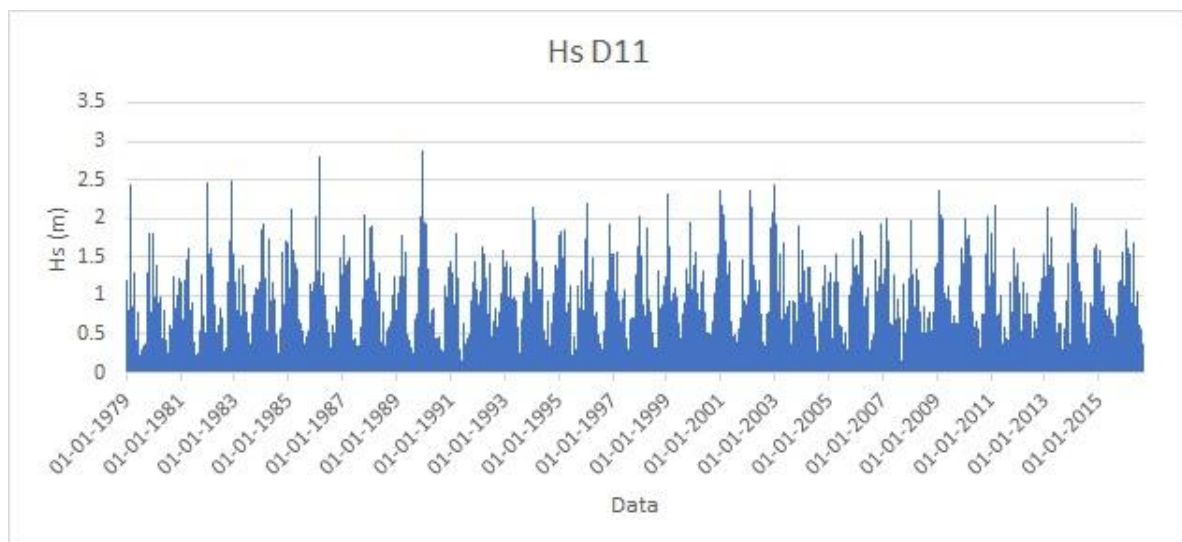


Figura 0.25 - Série temporal de Altura significativa (Hs) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS

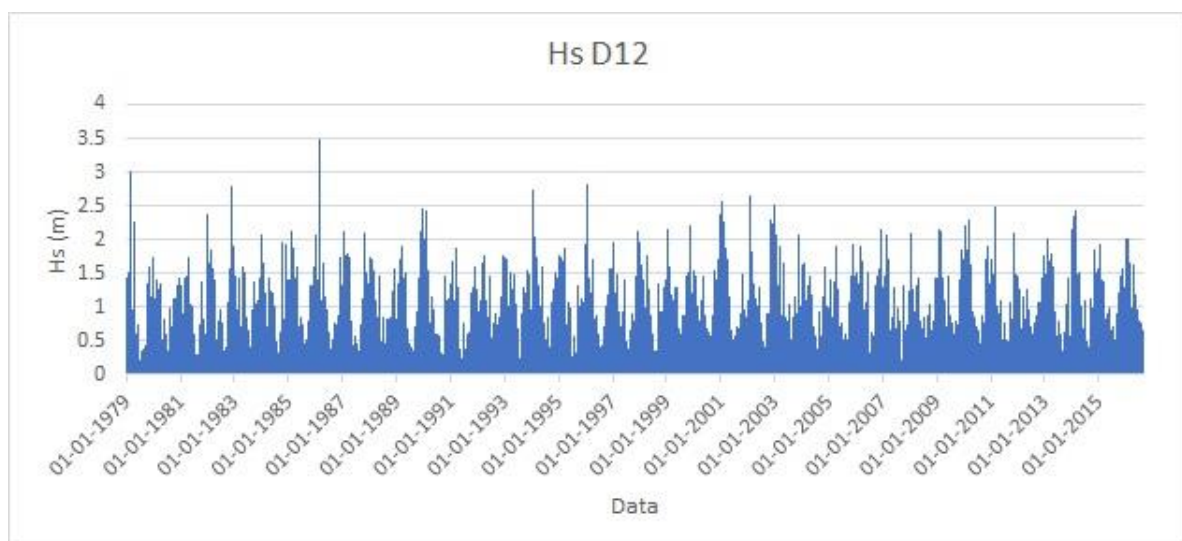


Figura 0.26 - Série temporal de Altura significativa (Hs) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS

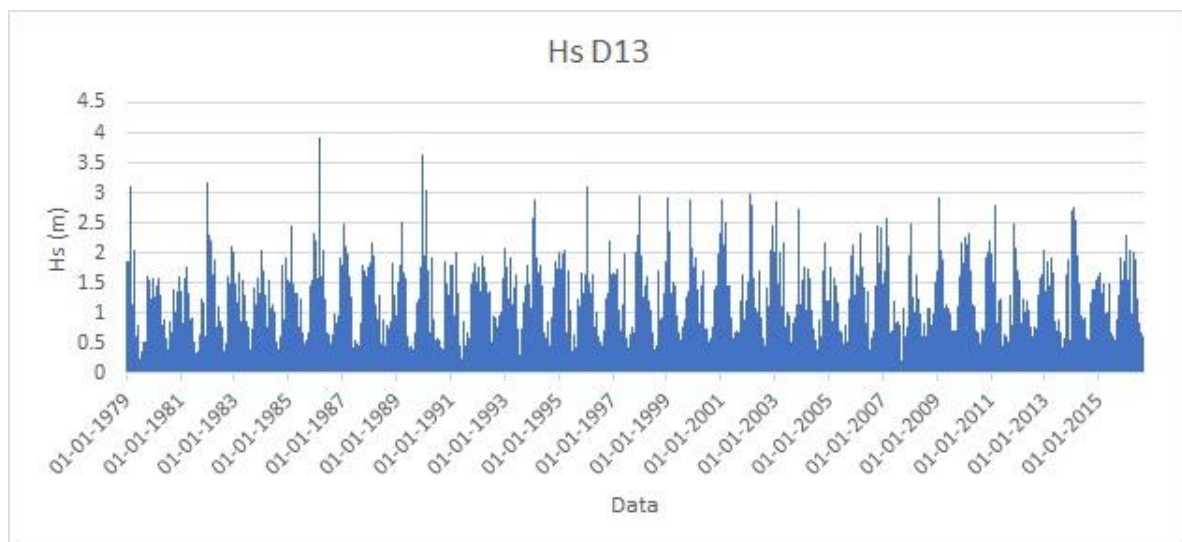


Figura 0.27 - Série temporal de Altura significativa (Hs) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS

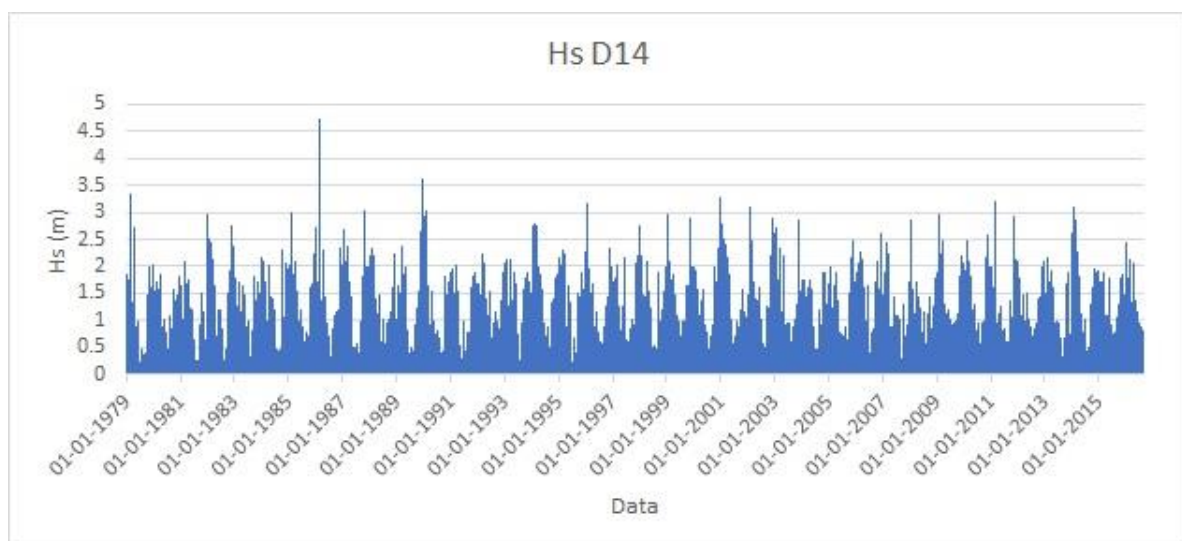


Figura 0.28 - Série temporal de Altura significativa (Hs) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS

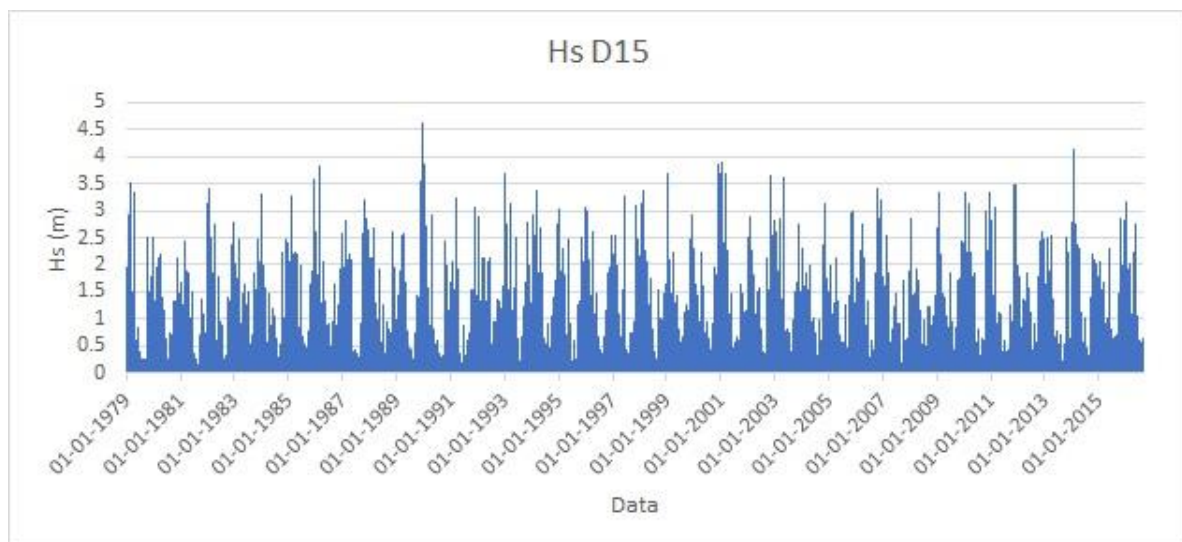


Figura 0.29 - Série temporal de Altura significativa (Hs) no ponto D1, obtido pelo modelo DREAMS

Comparação do parâmetro H_s para os 15 pontos analisados.

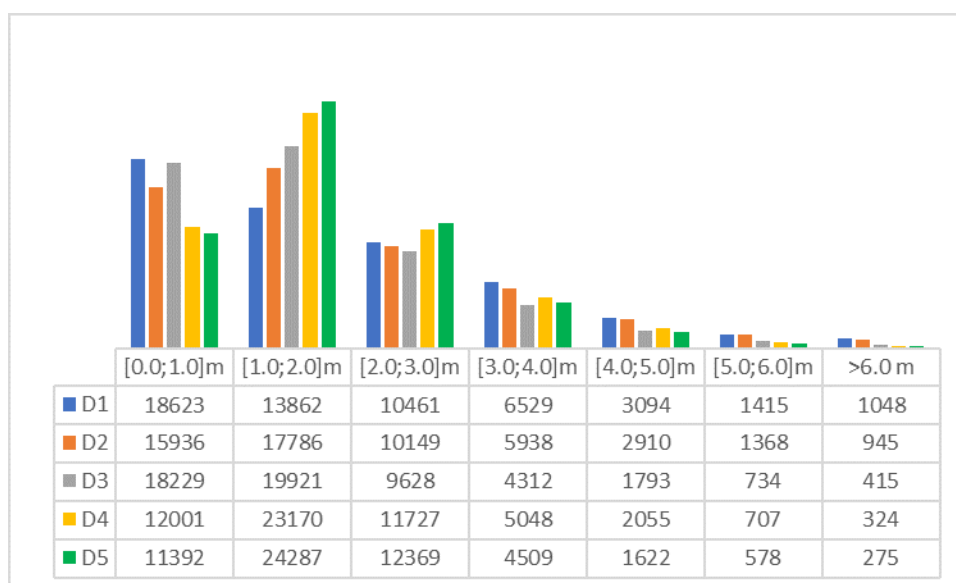


Figura 0.30 - Histogramas de alturas significativas (D1 a D5)

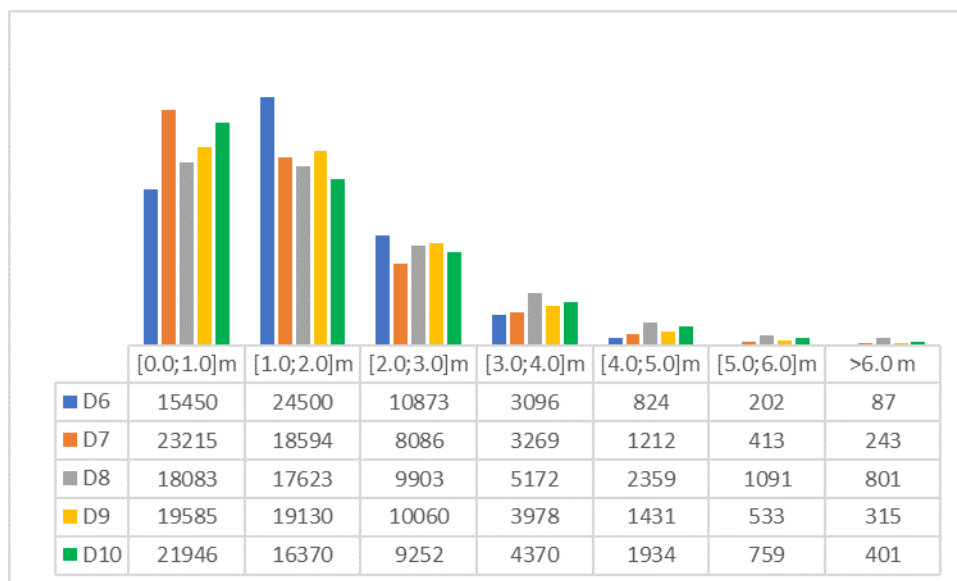


Figura 0.31 - Histogramas de alturas significativas (D6 a D10)

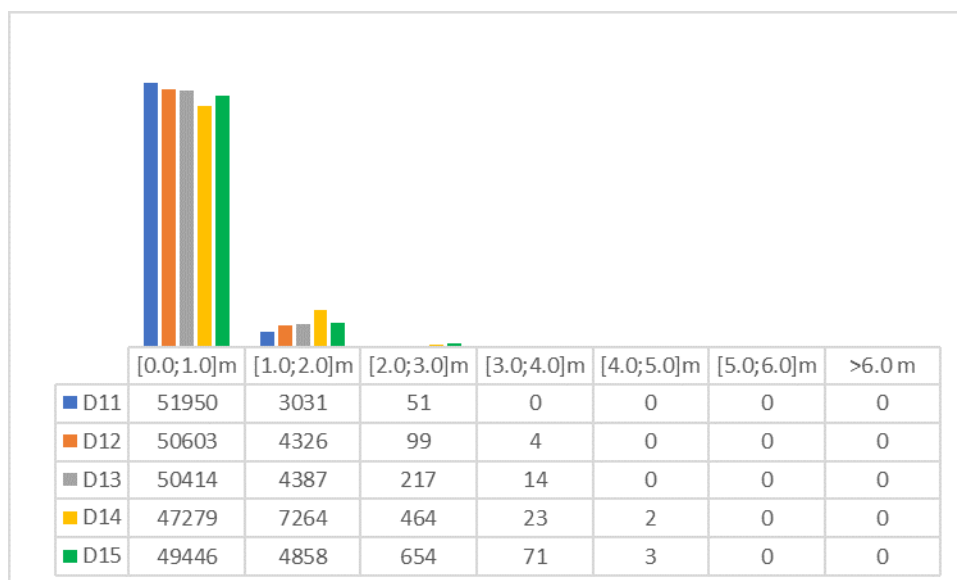


Figura 0.32 - Histogramas de alturas significativas (D11 a D15).

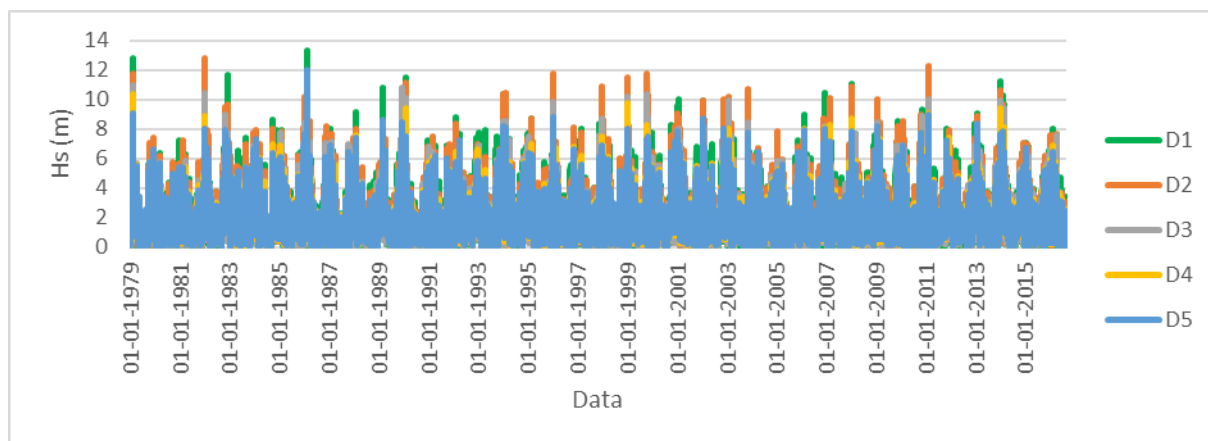


Figura 0.33 – Comparação entre os valores de Hs obtidos através no modelo DREAMS, correspondentes a cinco pontos (D1 a D5) pertencentes ao quebra-mar norte.

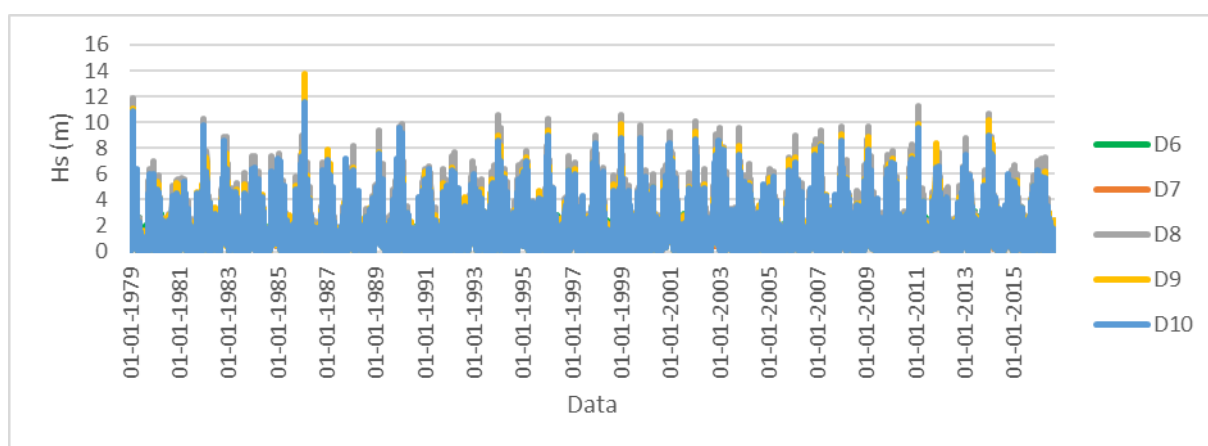


Figura 0.34 - Comparação entre os valores de Hs obtidos através no modelo DREAMS, correspondentes a cinco pontos (D6 a D10) pertencentes ao molhe sul.

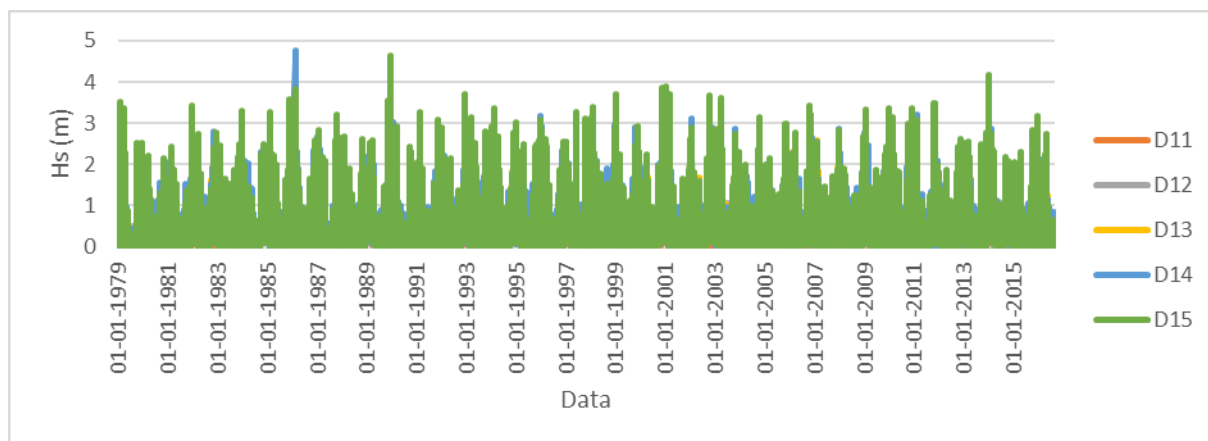


Figura 0.35 - Comparação entre os valores de Hs obtidos através no modelo DREAMS, correspondentes aos cinco pontos (D11 a D15) pertencentes ao quebra-mar sul.

Gráfico representativo do período médio (T_m) para os 15 pontos analisados, durante o período de 1979 e 2016.

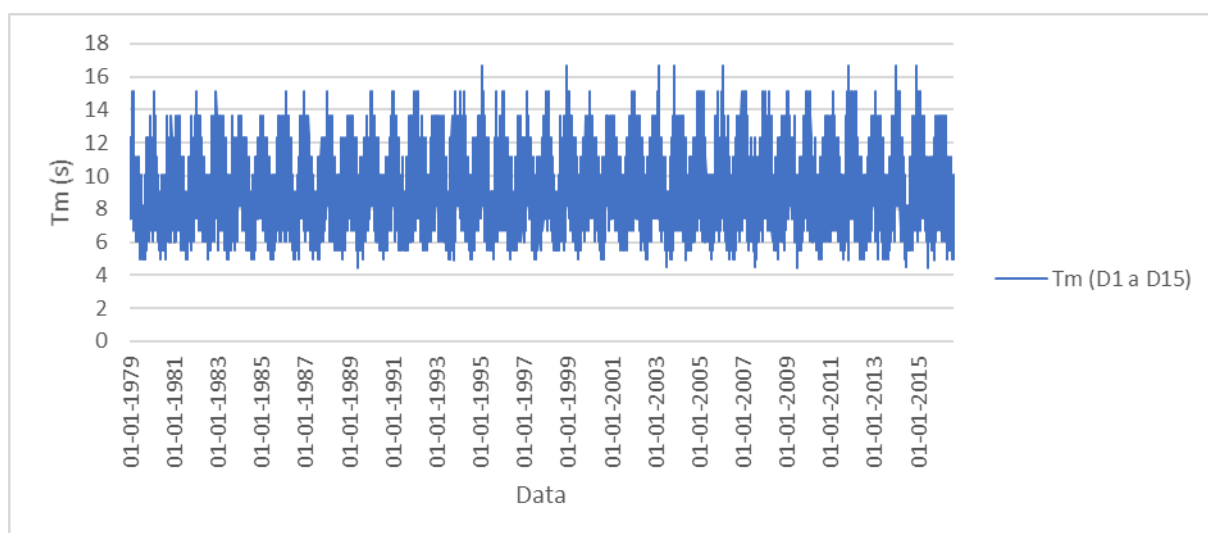


Figura 0.36 - Período médio (T_m) calculado pelo modelo DREAMS para o conjunto dos 15 pontos analisados

Anexo E Execução da ferramenta NN_OVERTOPPING2

Os procedimentos necessários para executar a ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 foram seguidos recorrendo às indicações do manual desta ferramenta (Coeveld, 2005), consistindo nos passos seguintes.

- ✚ Instalar a ferramenta NN_OVERTOPPING2, e abrir a pasta respetiva.
- ✚ Estudar as estruturas físicas alvo no estudo de galgamento, e identificar os 15 parâmetros necessários para correr a ferramenta neuronal.
- ✚ Na pasta da ferramenta, preencher o ficheiro “NN_OVERTOPPING.inp”, que deverá conter os valores dos 15 parâmetros da estrutura em estudo. Neste ficheiro, a ordem dos parâmetros é de extrema importância, uma vez que a ferramenta NN_OVERTOPPING só irá correr devidamente quando os 15 parâmetros se encontram estruturados do seguinte modo:

[β (°), h (m), $H_{m0, toe}$ (m), $T_{m-1,0 toe0}$ (s), h_t (m), B_t (m), γ_f , cot(ad), cot(au), R_c (m), B (m), h_b (m), tan(ab), A_c (m), G_c (m)]

A estrutura do ficheiro de input dos parâmetros é representada pela figura 0.37.

NN_OVERTOPPING.INP - Bloco de notas															-	□	X
Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda													
34.6645	14.9000	7.3007	11.2050	14.9000	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	10.1000	1.5000	4.1000	0.0000	3.4000	10.0000			
36.4357	17.0600	5.5642	11.2050	17.0600	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	7.9400	1.5000	6.2600	0.0000	1.2400	10.0000			
30.9554	14.5100	6.6749	11.2050	14.5100	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	10.4900	1.5000	3.7100	0.0000	3.7900	10.0000			
36.5816	17.0000	4.5185	11.2050	17.0000	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	8.0000	1.5000	6.2000	0.0000	1.3000	10.0000			
31.4912	14.5800	5.2997	11.2050	14.5800	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	10.4200	1.5000	3.7800	0.0000	3.7200	10.0000			
39.1140	17.2700	3.6206	10.1283	17.2700	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	7.7300	1.5000	6.4700	0.0000	1.0300	10.0000			
34.0756	14.3700	3.8712	10.1283	14.3700	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	10.6300	1.5000	3.5700	0.0000	3.9300	10.0000			
39.0398	17.0100	3.0033	10.1283	17.0100	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	7.9900	1.5000	6.2100	0.0000	1.2900	10.0000			
33.7105	14.5600	2.4305	8.2753	14.5600	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	10.4400	1.5000	3.7600	0.0000	3.7400	10.0000			
69.4620	17.1700	1.9817	6.7613	17.1700	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	7.8300	1.5000	6.3700	0.0000	1.1300	10.0000			
54.4353	14.5600	3.1097	6.7613	14.5600	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	10.4400	1.5000	3.7600	0.0000	3.7400	10.0000			
51.5896	16.7400	3.6064	7.4801	16.7400	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	8.2600	1.5000	5.9400	0.0000	1.5600	10.0000			
33.2750	14.8400	4.2271	8.2753	14.8400	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	10.1600	1.5000	4.0400	0.0000	3.4600	10.0000			
32.8957	16.7700	4.6406	8.2753	16.7700	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	8.2300	1.5000	5.9700	0.0000	1.5300	10.0000			
24.2688	14.9800	5.8437	9.1550	14.9800	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	10.0200	1.5000	4.1800	0.0000	3.3200	10.0000			
17.7921	16.2700	4.8952	10.1283	16.2700	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	8.7300	1.5000	5.4700	0.0000	2.0300	10.0000			
27.2680	15.2800	4.1092	10.1283	15.2800	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	9.7200	1.5000	4.4800	0.0000	3.0200	10.0000			
21.1687	16.2500	2.8599	10.1283	16.2500	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	8.7500	1.5000	5.4500	0.0000	2.0500	10.0000			
21.3934	15.5000	1.9090	9.1550	15.5000	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	9.5000	1.5000	4.7000	0.0000	2.8000	10.0000			
18.7110	15.8000	1.1149	9.1550	15.8000	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	9.2000	1.5000	5.0000	0.0000	2.5000	10.0000			
18.1571	15.7400	0.8058	9.1550	15.7400	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	9.2600	1.5000	4.9400	0.0000	2.5600	10.0000			
17.1429	15.7700	0.4647	9.1550	15.7700	0.0000	0.4000	1.0000	3.0000	9.2300	1.5000	4.9700	0.0000	2.5300	10.0000			

Figura 0.37 - Exemplo de ficheiro " NN_OVERTOPPING.inp ".

- ✚ Correr a ferramenta através do ficheiro “NN_OVERTOPPING.exe”. Serão gerados dois ficheiros distintos, nomeadamente o ficheiro de output “NN_OVERTOPPING.lis”, que corresponde aos resultados de galgamento sobre a estrutura estudada, e o ficheiro “NN_OVERTOPPING.err”, que é gerado se forem contabilizados erros durante a corrida da ferramenta, sendo identificados pelo utilizador.
- ✚ Abrir o ficheiro “NN_OVERTOPPING.lis” (figura 0.38). Neste ficheiro estão indicados os resultados da ferramenta, assim como comentários representativos de erros causados por parâmetros não concordantes com os limites de referência da ferramenta neuronal.

```

NN_OVERTOPPING.lis - Bloco de notas
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
* application.
*
* Although a reliability level is given in addition to the predictions, these
* reliability levels do not account for most of these influences. Therefore,
* the Neural Network predictions should only be used as first
* estimates of mean overtopping discharges.
*
*
* Neither DELTARES nor the authors of the tool or any other persons or
* institutes involved in the design of this tool, shall be responsible for any
* damage rising out of the use and application of the software. In no event they
* will be liable for direct, indirect, incidental, special, or consequent damages
* rising out of the use of or inability to use the software or documentation.
* Consequently, they are not responsible for any costs including, but not limited
* to, claims by third persons. The user is liable for a responsible application of
* the software. The user has NO ownership rights and may not make any alterations.
*
*
* Refer to the User Manual NN_OVERTOPPING for details regarding the use of this tool.
*
*
* All intellectual property rights necessary to license NN_OVERTOPPING ("the Product")
* are vested in DELTARES and the user shall not claim or assert
* title in or ownership of the Product.
*
*
* For more information please contact DELTARES :
* support@deltaressystems.nl
*
*****
* Col 01      02      03      04      05      06      07      08      09      10
* q [m3/s/m] q[ 2.50%] q[ 5.00%] q[15.00%] q[50.00%] q[75.00%] q[95.00%] q[97.50%] Nr.Pat. REMARK I
0.3899E-02 [m3/s/m] 0.3264E-02 0.6560E-04 0.1162E-03 0.8877E-03 0.3312E-02 0.1282E-01 0.7746E-01 0.1748 1 4 |REMARK > For prototype, rough-sloping structures, a correction factor is applied: q =
0.1464E-02 0.2316E-04 0.4275E-04 0.2987E-03 0.1498E-02 0.6589E-02 0.4169E-01 0.9692E-01 2 4 |REMARK > For prototype, rough-sloping structures, a correction factor is applied: q =
0.1747E-02 [m3/s/m] 0.1434E-02 0.3689E-04 0.5811E-04 0.4203E-03 0.1511E-02 0.5332E-02 0.2967E-01 0.6042E-01 3 4 |REMARK > For prototype, rough-sloping structures, a correction factor is applied: q =
0.1721E-02 [m3/s/m] 0.1675E-03 0.6457E-05 0.1010E-04 0.7358E-04 0.3818E-03 0.1806E-02 0.1151E-01 0.2635E-01 4 4 |REMARK > For prototype, rough-sloping structures, a correction factor is applied: q =
0.7293E-03 [m3/s/m] 0.2473E-03 0.5253E-05 0.7851E-05 0.5827E-04 0.2610E-03 0.1804E-02 0.7156E-02 0.1166E-01 5 5 |REMARK > For prototype, rough-sloping structures, a correction factor is applied: q =
0.5893E-03 [m3/s/m]. Since 10^-6 < Q < 10^-5, the NN prediction is less reliable (indicative) 0.5867E-04 0.8030E-06 0.1762E-05 0.1714E-04 0.1843E-03 0.5311E-03 0.5158E-02 0.1038E-01 6 5 |REMARK > For prototype, rough-sloping structures, a correction factor is applied: q =
0.3602E-03 [m3/s/m]. Since 10^-6 < Q < 10^-5, the NN prediction is less reliable (indicative) 0.2431E-04 0.3965E-06 0.5784E-06 0.5322E-05 0.2405E-04 0.1153E-03 0.8557E-03 0.1473E-02 7 5 |REMARK > For prototype, rough-sloping structures, a correction factor is applied: q =
0.1691E-03 [m3/s/m]. Since 10^-6 < Q < 10^-5, the NN prediction is less reliable (indicative) 0.2163E-04 0.1701E-06 0.5146E-06 0.5575E-05 0.4049E-04 0.2323E-03 0.2340E-02 0.9618E-02 8 5 |REMARK > For prototype, rough-sloping structures, a correction factor is applied: q =
0.2164E-03 [m3/s/m]. Since 10^-6 < Q < 10^-5, the NN prediction is less reliable (indicative)

```

Figura 0.38 - Exemplo de ficheiro "NN_OVERTOPPING.lis".

Os valores de caudal de galgamento (q) calculados pela ferramenta são indicados na primeira coluna do ficheiro, sendo que as colunas 2 a 8 são representadas pelos quantis q2.5%, q5%, q25%, q50%, q75%, q95% e q97.5%. a coluna 9 representa a ordem de entrada de cada simulação, e as restantes colunas são indicativas do tipo de erro, se existente, durante o calculo do respetivo valor de q.

Os erros existentes, e descritos pela ferramenta, deverão ser revistos e eliminados. No caso do presente estudo, respeitante ao erro do tipo 3 (“**WARNING> For Q < 10⁻⁶, no prediction is given!**”) a ferramenta não calculou resultados inferiores a 10⁻⁶ sendo necessário aplicar a equação 0.1 para calcular os valores de caudal nestes casos.

$$Q = \frac{q}{\sqrt{g \times H_s^3}} \Leftrightarrow q = Q \times \sqrt{g \times H_s^3}$$

0.1

Anexo F Resultados da ferramenta NN_OVERTOPPING2

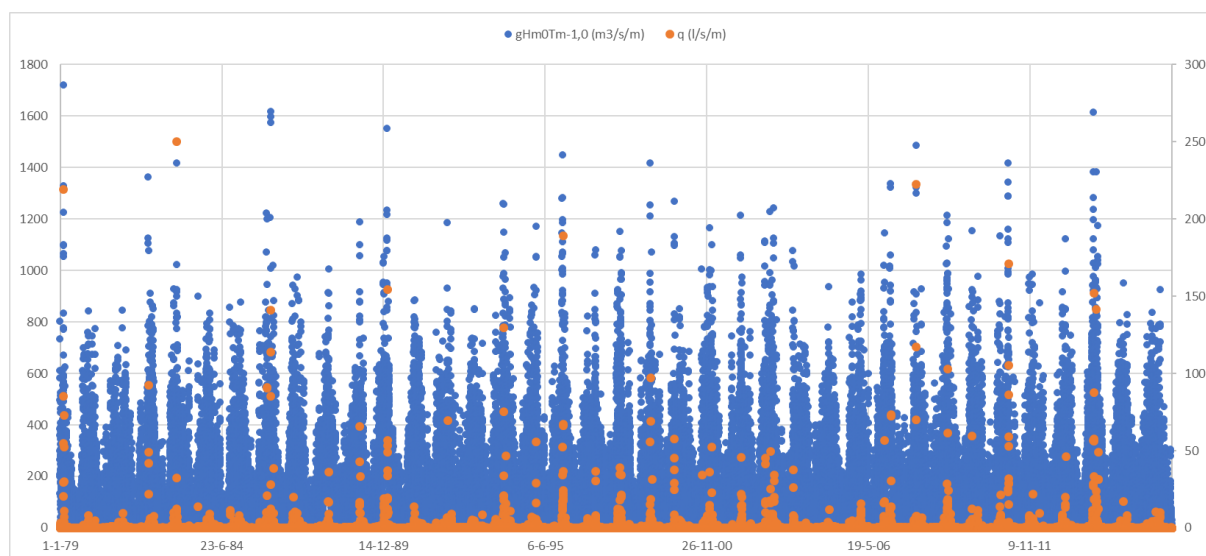


Figura 0.39 - Série temporal do parâmetro $gHm0Tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto D1, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

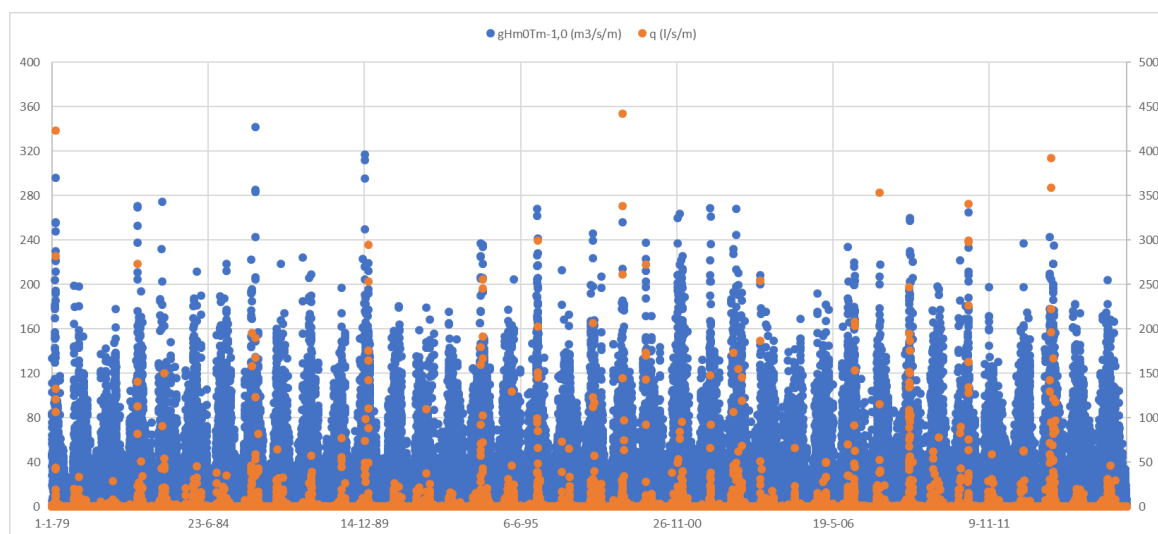


Figura 0.40 - Série temporal do parâmetro $gHm0Tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto D2, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

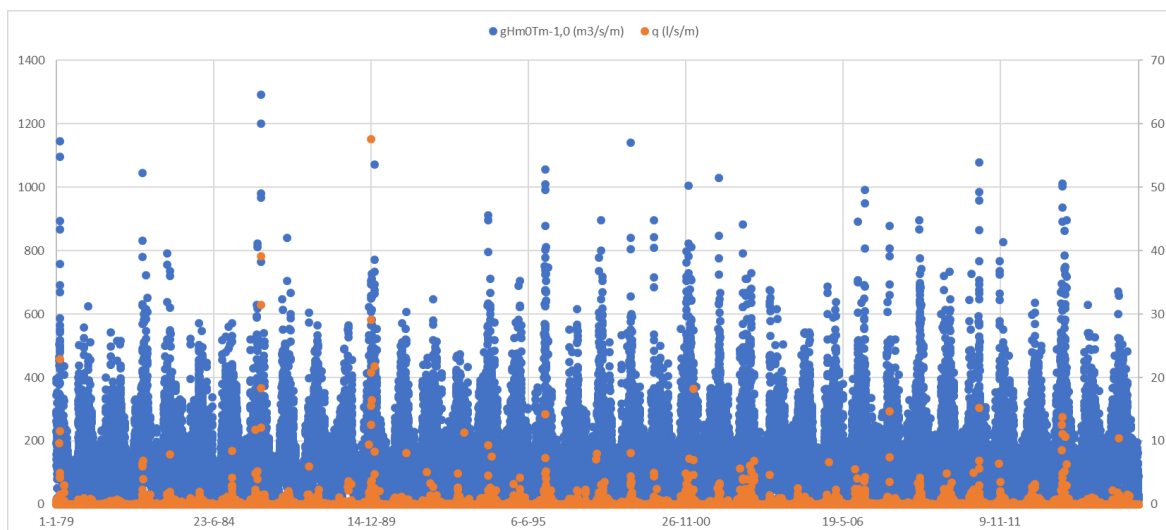


Figura 0.41 - Série temporal do parâmetro gHm0Tm-1,0 e do caudal médio galgado, q, no ponto D3, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

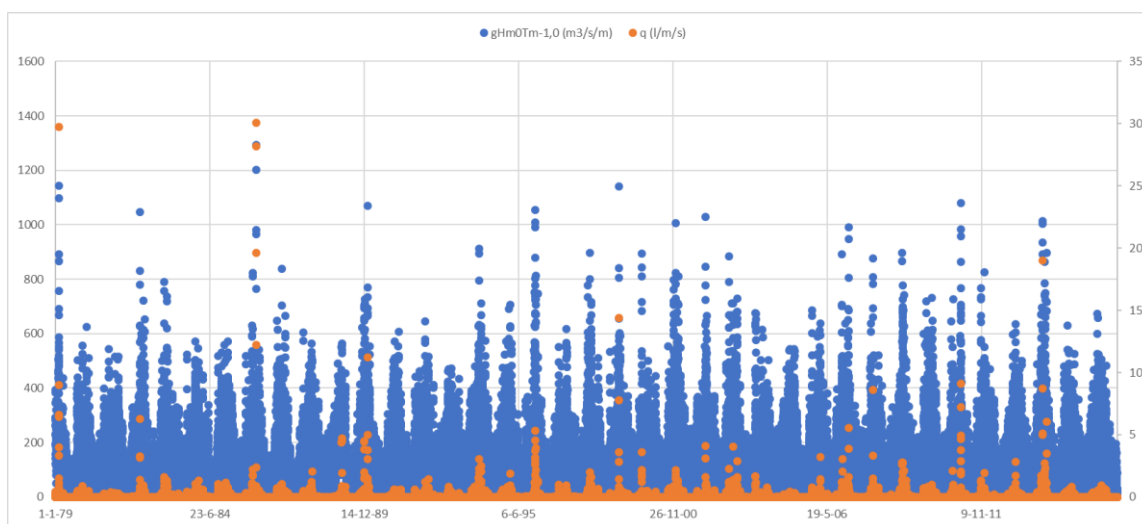


Figura 0.42 - Série temporal do parâmetro gHm0Tm-1,0 e do caudal médio galgado, q, no ponto D4, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

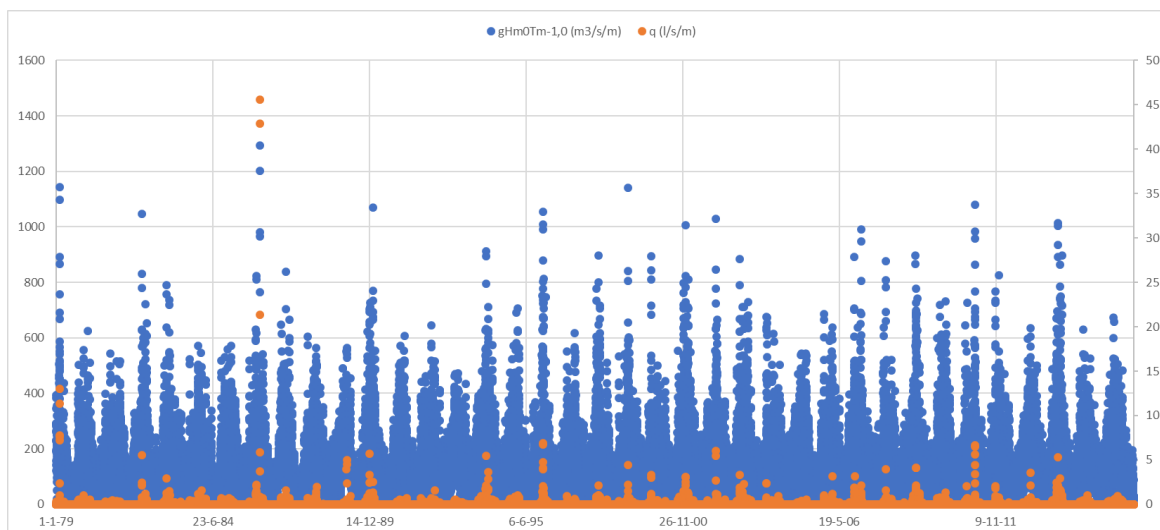


Figura 0.43 - Série temporal do parâmetro gHm0Tm-1,0 e do caudal médio galgado, q, no ponto D5, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

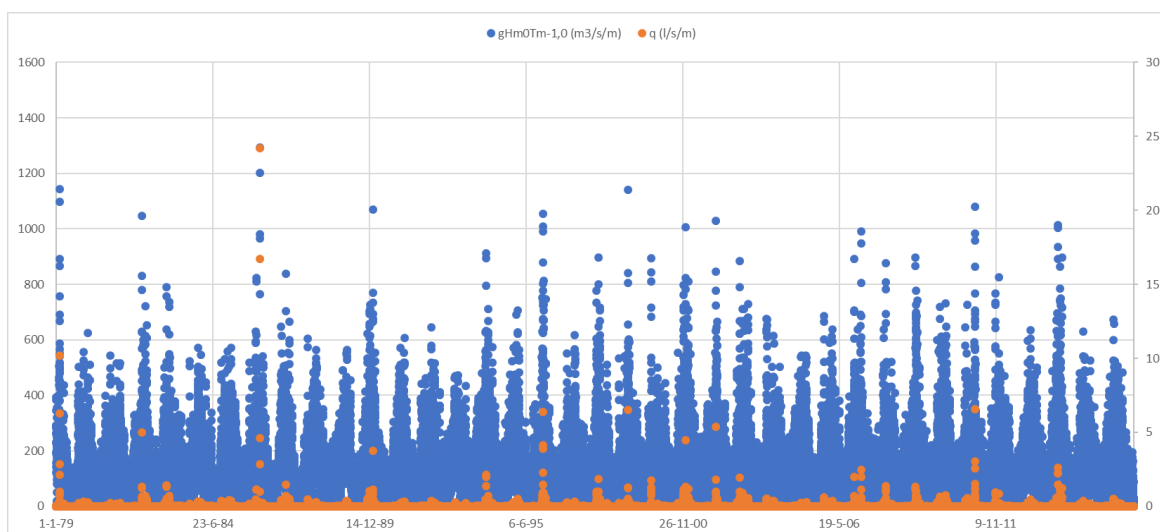


Figura 0.44 - Série temporal do parâmetro gHm0Tm-1,0 e do caudal médio galgado, q, no ponto D6, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

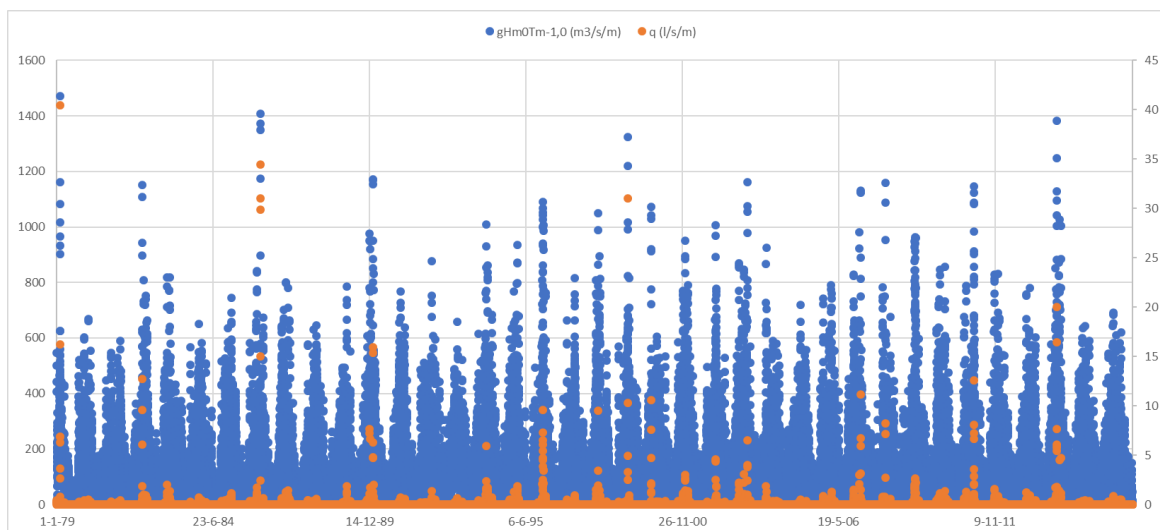


Figura 0.45 - Série temporal do parâmetro gHm0Tm-1,0 e do caudal médio galgado, q, no ponto D7, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

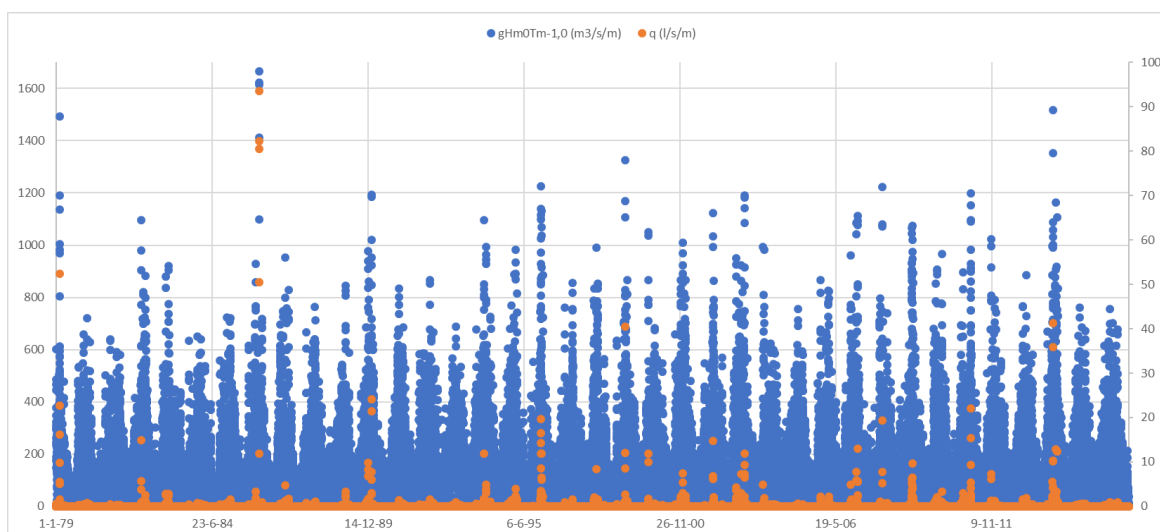


Figura 0.46 - Série temporal do parâmetro gHm0Tm-1,0 e do caudal médio galgado, q, no ponto D9, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

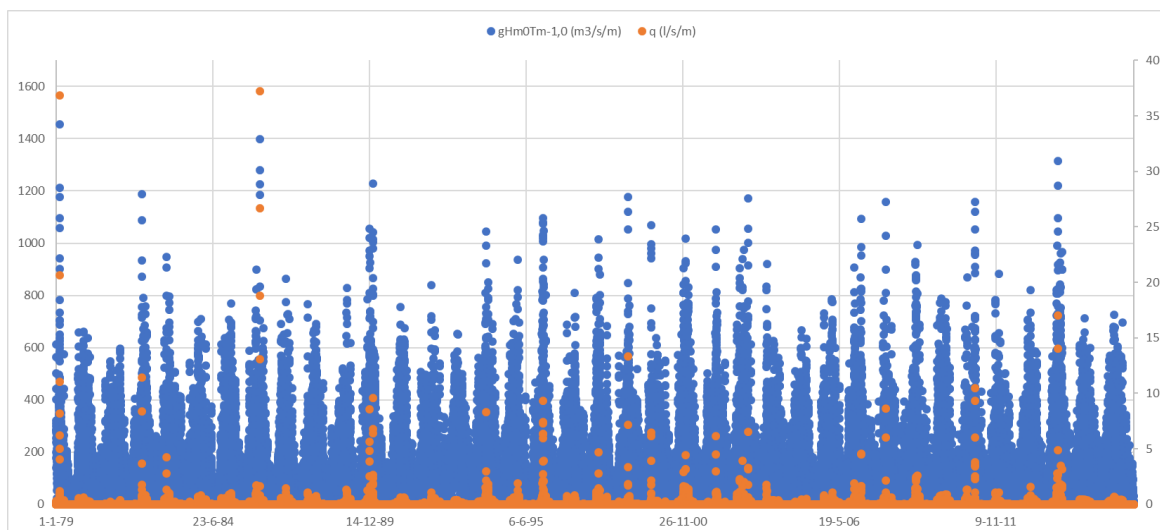


Figura 0.47 - Série temporal do parâmetro $gHm0Tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto D10, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

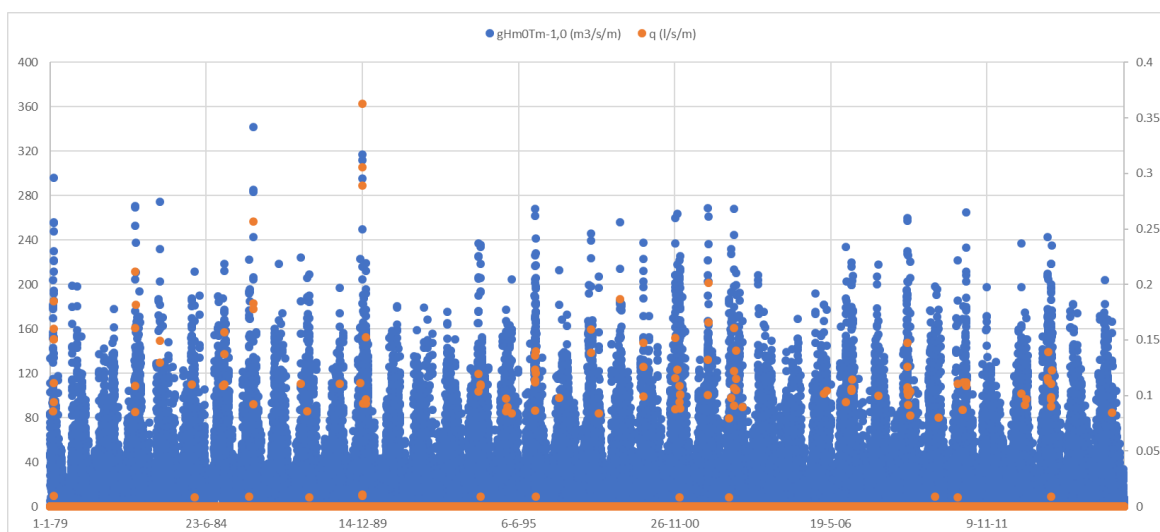


Figura 0.48 - Série temporal do parâmetro $gHm0Tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto D11, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

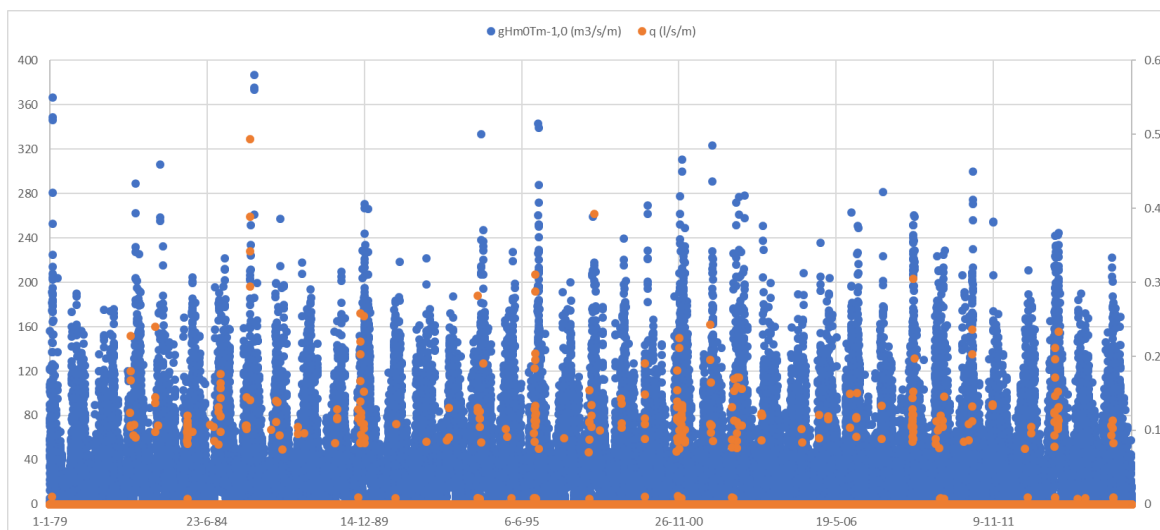


Figura 0.49 - Série temporal do parâmetro $gHm0Tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto D12, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

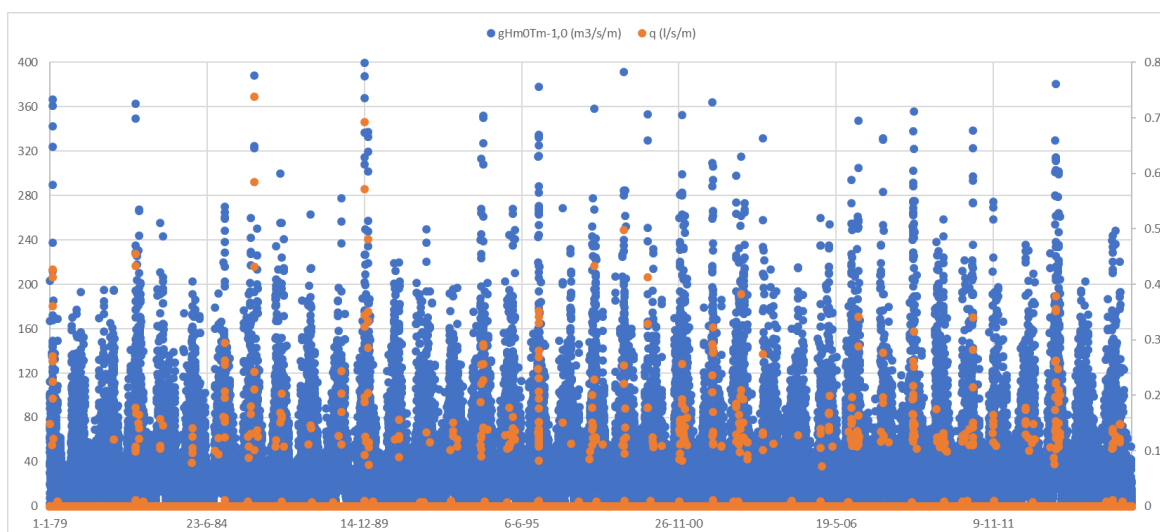


Figura 0.50 - Série temporal do parâmetro $gHm0Tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto D13, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

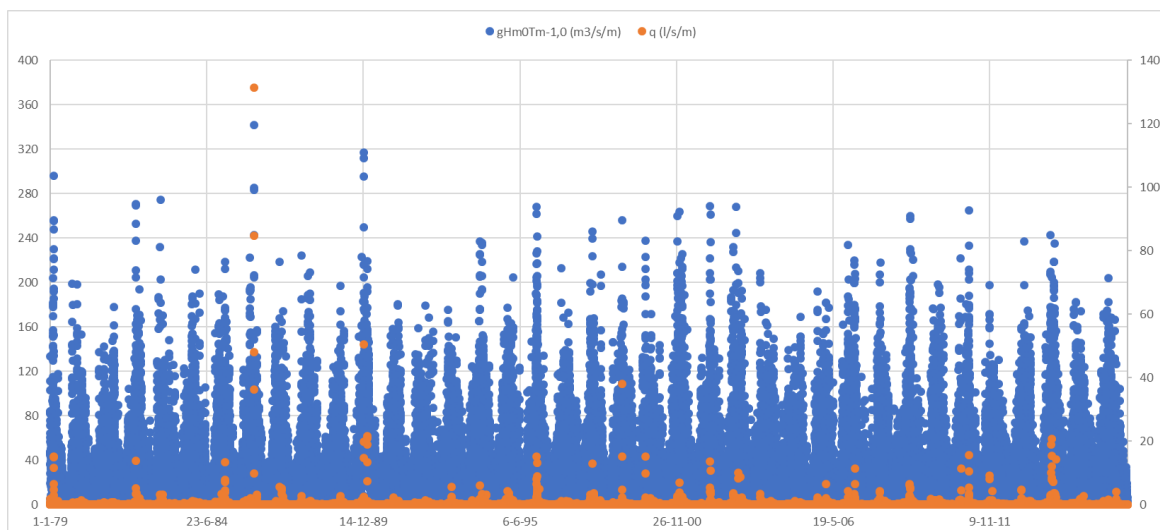


Figura 0.51 - Série temporal do parâmetro $gHm0Tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto D14, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

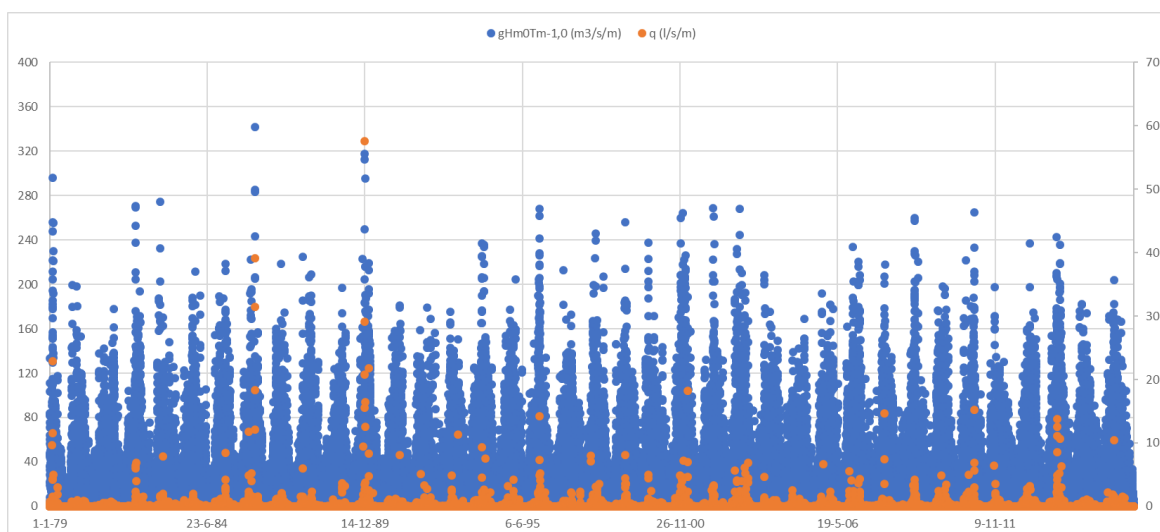


Figura 0.52 - Série temporal do parâmetro $gHm0Tm-1,0$ e do caudal médio galgado, q , no ponto D15, obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.